

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(национальный исследовательский университет)»

О.В. БАТУРИН, Н.В. БАТУРИН, В.Н. МАТВЕЕВ

**ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ В
ПРЕПРОЦЕССОРЕ *GAMBIT* УНИВЕРСАЛЬНОГО
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА *FLUENT***

Электронное учебное пособие

САМАРА
2010

Авторы: БАТУРИН Олег Витальевич,
БАТУРИН Николай Витальевич,
МАТВЕЕВ Валерий Николаевич

В данном электронном учебном пособии рассмотрены вопросы подготовки расчетных моделей в препроцессоре *Gambit*, создания или импорта моделей из САД программ, разбиения их с помощью конечноэлементной сетки и назначения граничных условий.

Пособие разработано на кафедре теории двигателей летательных аппаратов СГАУ и предназначено для магистров, обучающихся по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» по дисциплинам «Газовая динамика авиационных двигателей и энергетических установок» и «Газовая динамика агрегатов и двигателей летательных аппаратов».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Основные условные обозначения	6
Введение	8
1. Общие сведения о работе в программе <i>Gambit</i>	11
1.1. Верхнее меню программы <i>Gambit</i>	16
1.1.1. Работа с файлами в <i>Gambit</i>	17
1.1.2. Работа с журнальным файлом	20
1.1.3. Импорт геометрии и расчетных моделей в программу <i>Gambit</i>	22
1.1.4. Экспорт расчетных сеток и геометрии	25
1.2. Кнопки управления видами	25
1.3. Использование мыши в программе <i>Gambit</i>	29
1.4. Типовая структура меню программы <i>Gambit</i>	29
1.5. Задание осей вращения и векторов в программе <i>Gambit</i>	32
2. Создание и редактирование геометрии расчетной области в программе <i>Gambit</i>	35
2.1. Построение элементов геометрии	38
2.1.1. Построение точек	40
2.1.2. Построение линий	41
2.1.3. Построение поверхностей	45
2.1.4. Построение объемов	48
2.2. Перемещение и копирование элементов геометрии	51
2.2.1. Перемещение и копирование элементов геометрии с помощью команды <i>move/copy</i>	51
2.2.2. Перемещение элементов геометрии с помощью команды <i>Align</i>	53
2.3. Сложение, вычитание и пересечение объемов и поверхностей	54
2.4. Разделение элементов геометрии на части и объединение нескольких геометрических элементов в один	56
2.5. Объединение совпадающих объектов	60
2.6. Удаление элементов геометрии	61
2.7. Группа меню редактирования атрибутов	62
2.8. Операции с локальными системами координат	63
2.9. Примеры построения расчетных моделей	65

2.9.1. Пример построения трехмерной расчетной модели на основе примитивной геометрии	65
2.9.2. Пример построения расчетной модели межлопаточного канала осевой турбины	73
2.9.3. Пример построения двухмерной модели центробежного вентилятора	88
2.9.4. Пример построение объемной расчетной модели обтекания зонда	95
3. Основные принципы построения конечноэлементной сетки в программе <i>Gambit</i>	99
3.1. Основные подходы к разбиению расчетной области на конечные элементы	99
3.2. Разбиение на конечные элементы расчетной области в программе <i>Gambit</i>	102
3.2.1. Разбиение линий на конечные элементы	107
3.2.2. Разбиение поверхностей на конечные элементы	110
3.2.3. Разбиение объемов на конечные элементы	112
3.2.4. Связанное разбиение элементов геометрии	114
3.2.5. Удаление сеток	117
3.3. Структурное разбиение пристеночных областей	117
3.4. Сгущение конечноэлементной сетки с помощью размерной функции (<i>Size Function</i>)	123
3.5. Оценка качества сетки	127
3.6. Примеры разбиения расчетной области на конечные элементы	132
3.6.1. Пример построения конечноэлементной сетки на линиях и поверхностях	132
3.6.2. Пример построения неструктурированной конечно-элементной сетки модели лопаточного венца турбины	137
3.7. Построение структурированной конечноэлементной сетки	142
3.7.1. Построение структурной сетки по схеме <i>Map</i>	146
3.7.2. Построение структурной сетки по схеме <i>Submap</i>	148
3.7.3. Построение структурной сетки по схеме <i>Tri-primitive</i>	149
3.7.4. Построение структурной сетки по схеме <i>Wedge</i>	150
3.7.5. Построение объемной структурной сетки по схеме <i>Cooper</i>	150
3.7.6. Стратегия построения структурной сетки на расчетных моделях сложной формы. Декомпозиция элементов.	152
3.8. Примеры построения структурной конечноэлементной сетки	153

3.8.1. Пример структурного разбиения куба со сферой внутри	153
3.2.2. Пример структурного разбиения параллелепипеда с тором	155
3.8.3. Пример структурного разбиения двух несоосных цилиндров	156
3.8.4. Пример структурного разбиение шара	158
3.8.5. Пример структурного разбиения фигуры сложной формы	159
4. Описание граничных условий в программе <i>Gambit</i>	162
Список использованных источников	170

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\dot{a}$	— скорость звука, м/с;
$\dot{a}_{\text{крит}}$	— критическая скорость, м/с;
D	— диаметр, м;
F	— площадь проходного сечения, м ² ;
G	— массовый расход воздуха или газа, кг/с;
k	— показатель изэнтропы, турбулентная кинетическая энергия, м ² /с ² ;
L	— удельная работа, Дж/кг;
m	— масса, кг;
M	— число Маха (отношение скорости потока к скорости звука); крутящий момент, Н · м;
n	— частота вращения, мин ⁻¹ ;
p	— давление, Па;
R	— удельная универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);
S	— линия тока;
T	— температура, К;
t	— время, с;
u, v, w	— проекции вектора скорости на координатные оси, м/с;
w	— скорость в относительном движении, м/с;
x, y, z	— координаты, м;
α	— углы потока в абсолютном движении, град;
β	— углы потока в относительном движении, град;
ε	— скорость диссипации турбулентной кинетической энергии;
ζ	— коэффициент потерь;
ρ	— плотность, кг/м ³ ;
σ	— коэффициент восстановления полного давления;
μ	— коэффициент полезного действия;
λ	— приведенная скорость;
μ	— динамическая вязкость, Па·с;
ω	— скорость рассеивания турбулентности, угловая скорость, рад/с

Индексы

<i>*</i>	— заторможенные параметры;
<i>a</i>	— осевая проекция;
<i>v</i>	— вход, воздух;
<i>г</i>	— газ;
<i>пр</i>	— профильный, приведенный;
<i>кр.</i>	— кромочный, критический;
<i>к</i>	— концевой, периферийный;
<i>лам</i>	— ламинарный;
<i>отр</i>	— отрывной;
<i>ср</i>	— средний;
<i>тр</i>	— трение;
<i>турб</i>	— турбулентный
<i>с</i>	— абсолютный;
<i>n</i>	— по нормали;
<i>r</i>	— радиальный;
<i>x,y,z</i>	— проекции на соответствующие координатные оси;
<i>w</i>	— относительный

Условные сокращения

<i>ВМ</i>	— верхнее меню программы <i>Gambit</i> ;
<i>ГДФ</i>	— газодинамические функции;
<i>ГМ</i>	— главное меню программ <i>Gambit</i> и <i>Fluent</i> ;
<i>ГУ</i>	— граничное условие;
<i>КЭ</i>	— конечные элементы;
<i>ОС</i>	— операционная система;
<i>ПД</i>	— поршневого двигателя;
<i>СК</i>	— система координат;
<i>ЦИАМ</i>	— Центральный институт авиационного моторостроения;
<i>CFD</i>	— <i>Computer Fluid Dynamics</i> (общепринятое сокращение «вычислительная газовая динамика»)

Остальные обозначения, индексы и условные сокращения объяснены в тексте.

ВВЕДЕНИЕ

Программный комплекс *Fluent* является одним из лидеров рынка коммерческих *CFD* программ для решения задач механики жидкостей и газов [25,26]. Программный комплекс *Fluent* позволяет решать задачи:

- течения жидкостей и газов в каналах произвольной формы;
- внешнего обтекания;
- теплопередачи (вынужденная и свободная конвекция, теплопередача и лучистый теплообмен);
- течения со свободными поверхностями;
- течения многофазных сред;
- течения реагирующих потоков, включая горение;
- движения твердых частиц и капель жидкости в потоке;
- изменения фазового состояния вещества (плавление, кипение, кристаллизация, испарение, кавитация);
- течения в движущихся каналах (например, в смесительных устройствах и турбомашинах);
- моделирования течения в каналах с меняющейся в процессе решения геометрией (например, в цилиндрах ДВС);
- акустики и др.

Типичный процесс исследования потока с помощью программного комплекса *Fluent* показан на блок-схеме (рис. 0.1).

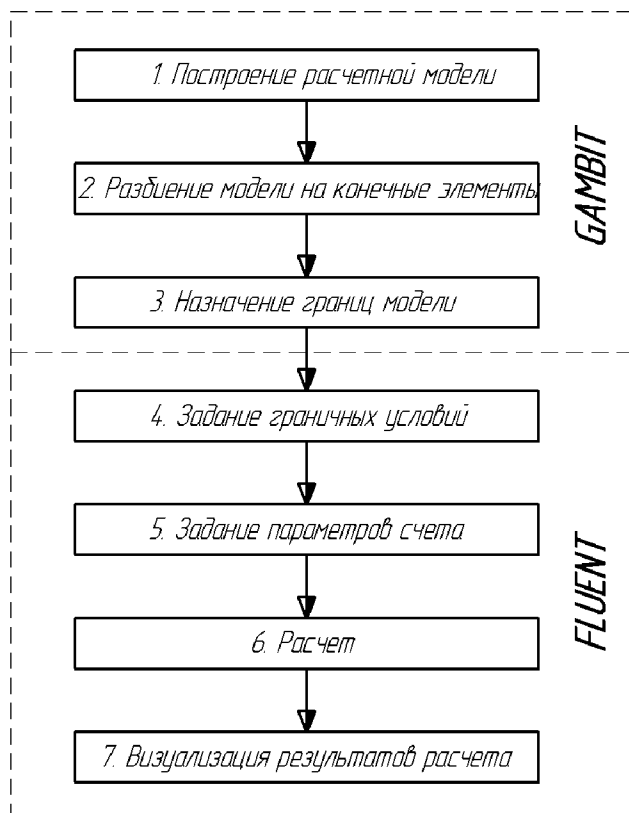


Рис. 0.1. Этапы решения газодинамических задач в программном комплексе *Fluent*

Первые три этапа решения задачи выполняются в программе *Gambit*, являющейся составной частью программного комплекса. Остальные этапы реализуются непосредственно в программе *Fluent*.

Данная книга посвящена работе в препроцессоре универсального комплекса газодинамических расчетов *Fluent* – программе *Gambit* и освещает пункты 1... ..3 на блок схеме 0.1.

Этот этап является одним из важнейших шагов к получению успешного решения поставленной задачи. Правильно созданная расчетная модель, грамотно разбитая на конечные элементы, существенно повышает качество решения поставленной задачи, снижает вероятность появления

нефизичных картин потока и способствует достижению результатов, близких к экспериментально полученным. Кроме того, качественная расчетная модель и сетка существенно облегчают процесс получения решения, повышая сходимости и устойчивость вычислительных процессов.

К сожалению, объем данного издания не позволяет показать всех возможностей препроцессора и рассказать обо всех командах. Поэтому информация, приведенная в методическом пособии, лишь показывает основные и наиболее применимые команды, используемые при решении задач течения жидкостей и газов.

Авторы выражают благодарность Рабкесову И.В., Шаблю Л.С., Попову Г.М, Ворошнину Д.В. и Беляеву В.В., оказавшим помощь при написании данной книги.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАБОТЕ В ПРОГРАММЕ *GAMBIT*

Программа *Gambit* - составная часть программного комплекса *Fluent* и является его основным препроцессором.

Внимание!!! *Gambit* создана для ОС *UNIX*. Для работы в «*Windows*» необходима эмуляция графического интерфейса программы. В качестве эмулятора обычно используется программа *Exceed*. Этот факт приводит к ряду особенностей в работе программы. Наиболее важные из них следующие:

1. Имя папки и путь к ней не должен содержать русских символов. В противном случае *Gambit* не запустится.

2. При загрузке ОС «*Windows*» раскладка клавиатуры по умолчанию должна быть английской. В случае если ОС загружается с русской раскладкой клавиатуры, в *Gambit* будет невозможным ввод букв в названиях элементов, граничных условий и файлов (будут активны только цифры), что создает определенные неудобства.

Gambit позволяет решать следующие задачи.

1. Создавать геометрию расчетной области:
 - создавать геометрию внутренними средствами программы;
 - импортировать геометрию расчетной области из *CAD* программ;
 - делить или объединять элементы геометрии для последующего построения структурной сетки.
2. Разбивать расчетную область на конечные элементы:
 - строить конечно-элементные сетки на базе треугольных и четырехугольных элементов;
 - управлять процессом разбиения.
3. Проверять качество расчетной сетки.

4. Определять границы расчетной области, на которых в дальнейшем будут установлены граничные условия.

5. Экспортировать конечноэлементные сетки в *Fluent* или другие расчетные программы.

Запуск программы *Gambit* осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню «Пуск» ОС «Windows»: *Пуск* → *Все программы* → *Fluent Inc Products* → *Gambit 2.3.16* → *Gambit 2.3.16*

Перед запуском программы появится диалоговое окно, изображенное на рис. 1.1. В нем, в поле *Working Directory*, указывается рабочая папка, в которой будут сохраняться файлы данной рабочей сессии. Выбрав ее, следует нажать кнопку *Run*.

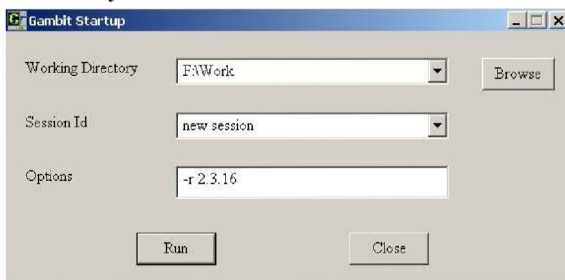


Рис. 1.1. Стартовое окно программы *Gambit*

Программа *Gambit* работает с несколькими типами файлов:

- с расширением **.dbs* – файл базы данных модели;
- с расширением **.dbt* – временный файл базы данных модели;
- с расширением **.jou* – журнальный файл, в котором записаны все действия пользователя. На его основе возможно осуществлять параметризацию модели;
- с расширением **.trn* – файл транскрипции;
- с расширением **.lok* – файл данных. Он создается только для модели, работа с которой ведется непосредственно в данный момент.

Внимание!!! В ряде случаев, программа *Gambit* после некорректного окончания работы может не запускаться. Для того, чтобы она заработала

часто достаточно удалить оставшиеся файлы с расширением *.lok* из рабочей папки.

При запуске программы в рабочей папке создается папка с именем «*GAMBIT #. №№#* - <Номер процесса>». При корректном окончании рабочей сессии эта папка удаляется автоматически. В случае некорректного закрытия сессии папка остается и ее следует удалить вручную. Здесь и далее под корректным выходом понимается выход с помощью команды: *File → Exit*. Выход из программы стандартным для ОС Windows способом, с помощью крестика в правом верхнем углу не является корректным.

Окно программы *Gambit* показано на рис. 1.2.

Как видно интерфейс программы состоит из следующих основных элементов.

Верхнее меню – меню, содержащее инструменты управления файлами (чтение, запись, импорт и т.п.) и некоторые настройки программы.

Область построения модели – место в окне программы, где отображается активная в текущий момент времени модель.

Окно сообщений – часть экрана, в которой в текстовом виде (на английском языке) показывается результат выполнения всех команд. Здесь также выводятся сообщения об ошибках. Окно сообщений можно раскрыть на все рабочее окно с помощью кнопки  в правом углу окна.

Окно описания кнопок – поле с кратким описанием (на английском языке) кнопок или элементов меню, на которые в данный момент времени указывает курсор.

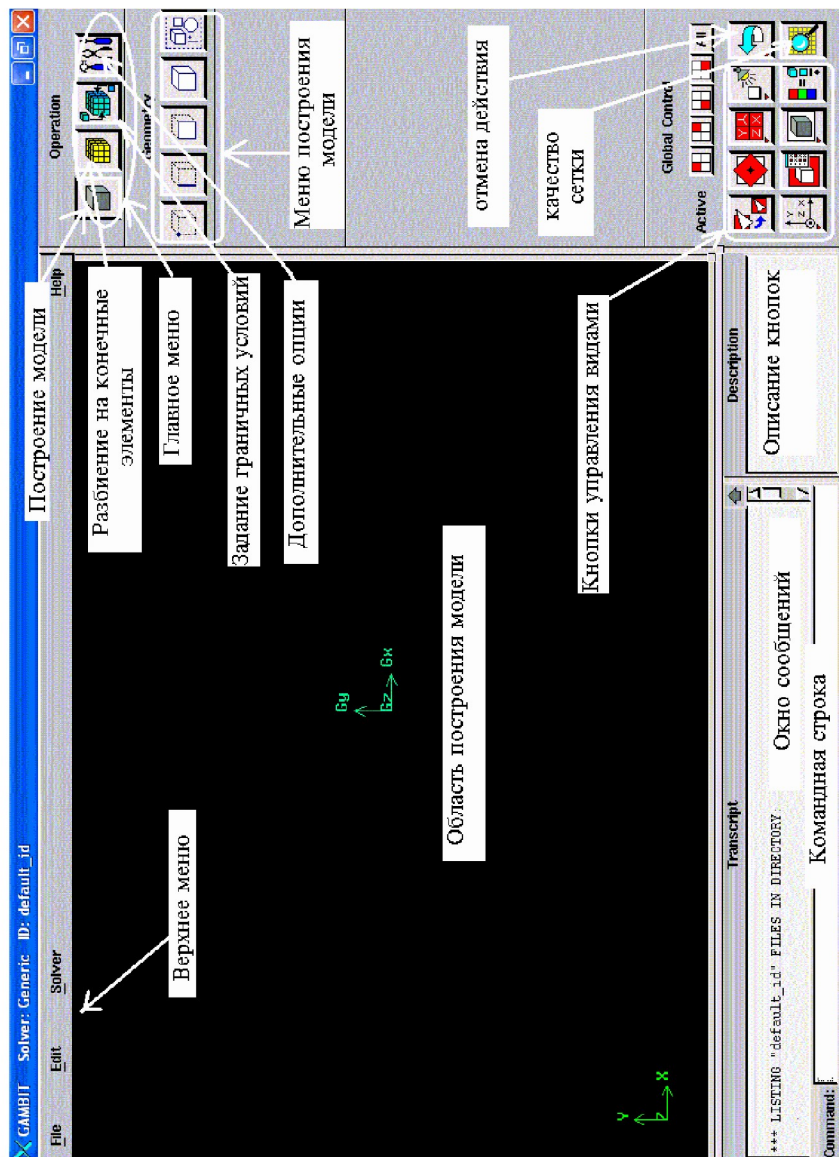


Рис. 1.2. Основное рабочее окно программы Gambit

Главное меню – основное меню, в котором находятся кнопки доступа к командам построения расчетной области, разбиения ее на конечные элементы и т.д. Структура главного меню показана на рис. 1.3. Подробнее обо всех командах будет рассказано в последующих разделах данной книги.

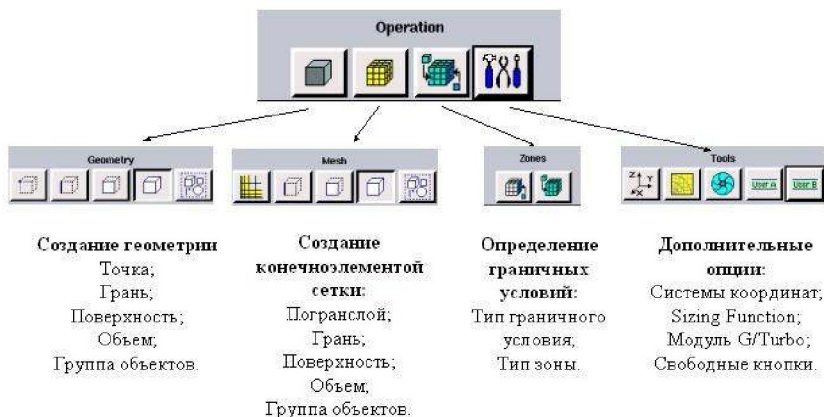


Рис. 1.3. Структура главного меню программы *Gambit*

В текущий момент времени можно работать только с одной моделью. Для перехода к новой модели, предыдущую нужно закрыть.

К достоинствам интерфейса программы *Gambit* относится то, что все кнопки снабжены простыми рисунками, отражающими суть операции. Кроме того, меню построения/редактирования различных элементов имеют одинаковую структуру, что заметно упрощает работу с программой и сокращает время ее освоения.

Следует обратить внимание на то, что многие кнопки в программе *Gambit* имеют маленький красный треугольник внизу. Это говорит о том, что, если щелкнуть на них правой клавишей мыши, то можно получить доступ к дополнительным командам сходного содержания (например, разным способам построения элементов).

1.1. Верхнее меню программы *Gambit*

Верхнее меню программы состоит из трех пунктов: *File*, *Edit* и *Solver*. Рассмотрим основные команды доступные в указанных подменю.

Внешний вид подменю *File* приведен на рис 1.4.

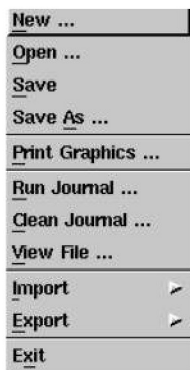


Рис 1.4. Подменю *File*

Через него осуществляется доступ к следующим командам:

- создания, открытия, сохранения под текущим или новым именем файла и выхода из программы (*New*, *Open*, *Save*, *Save As*, *Exit* соответственно (рис. 1.4));
- вывода изображения из графического окна в файл или на принтер (*Print Graphics* (рис. 1.4));
- чтения журнала (*Run Journal* (рис. 1.4));
- очистки журнала от ненужной информации (*Clean Journal* (рис. 1.4));
- импорта геометрии из *CAD* программ в форматах *ACIC*, *Parasolid*, *IGES*, *STEP*, *ICEM* и др. (*Import* (рис. 1.4)).
- экспорт моделей в другие программы в форматах *ACIC*, *Parasolid*, *IGES*, *STEP* и др. и расчетной модели в выбранную *CAD/CAE* программу (*Export* (рис. 1.4)).

Внешний вид подменю *Edit* приведен на рис. 1.5. С его помощью можно осуществлять следующие действия:

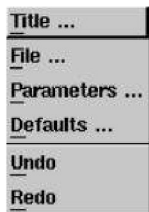


Рис 1.5. Меню *Edit*

- ввести заголовки графических окон (*Title*);
- изменить некоторые параметры (*Parameters*);
- изменить значения параметров, установленных по умолчанию (*Defaults*);
- отменить или повторить последние действия (*Undo/Redo*). Эти команды дублируются кнопками, находящимися среди кнопок управления видами (рис. 1.2 и 1.14)

Внешний вид подменю *Solver* приведен на рис. 1.6.



Рис 1.6. Меню *Solver*

С его помощью осуществляется выбор расчетной программы, в которой будет проходить расчет. От него зависит набор доступных граничных условий и типов конечных элементов. В случае, если расчет будет производиться в программе *Fluent*, нужно выбрать пункт *Fluent 5/6*. В версии *Fluent 6.3.26* этот тип решателя установлен по умолчанию.

1.1.1. Работа с файлами в *Gambit*

Работа с новой расчетной моделью начинается с задания ее имени. Это действие осуществляется с помощью команды:

BM: File → New.

В результате появится диалоговое окно, изображенное на рис. 1.7.

В этом окне в графе *ID* набирается имя модели латинскими буквами. Выбор имени подтверждается нажатием кнопки *Accept*.

После этого действия появится окно, уточняющее согласен ли пользователь закрыть предыдущую сессию. В нем следует нажать кнопку *Yes*. После этого в верхнем левом углу окна программы появится выбранное имя модели.

Если до создания новой модели производилась работа над другой моделью и ее необходимо сохранить перед закрытием, то следует нажать кнопку *Save current session* в этом же окне (рис. 1.7). В результате старая рабочая сессия будет сохранена. Работа параллельно с двумя моделями в *Gambit* невозможна.

Чтение уже созданных моделей, сохранение под другим именем и другие

операции с файлами во многом аналогичны работе с файлами в других программах ОС *Windows*. В качестве иллюстрации на рис. 1.8 приведено меню команды

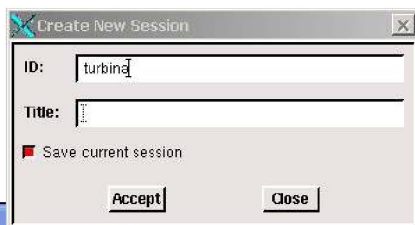


Рис. 1.7. Меню создания новых моделей (*File → New*)

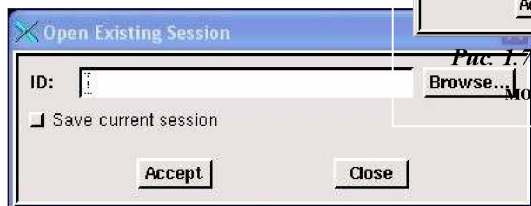


Рис. 1.8. Меню чтения существующей модели

чтения созданной модели *Open Existing Session*.

В этом меню в поле *ID* выбирается имя файла модели с расширением **.dbs*. Процесс чтения запускается нажатием кнопки *Accept*. Как и в предыдущей команде, активация опции *Save current session* сохранит предыдущую открытую модель.

Для того, чтобы выбрать файл модели, подобно тому, как это делается в других программах, следует нажать кнопку *Browse*. В результате будет открыто окно проводника (рис. 1.9), с помощью которого можно отыскать требуемый файл. Однако работа в нем имеет определенную специфику. Окно проводника применяется во всех командах, связанных с выбором файла.

По умолчанию проводник будет открыт в рабочей папке, которая была указана в стартовом окне программы *Gambit* (рис.1.1). Обратите внимание, что на рис 1.9 (левое поле, третий пункт) видно, что имя папки, состоящее из русских букв, читается некорректно.

Меню проводника состоит из двух больших полей: в левом (*Directories*) приведены папки, содержащиеся в рабочей директории, в правом (*Files*) – файлы с требуемым расширением (тип расширения зависит от команды), находящиеся в активной папке. Если требуемый файл находится в рабочей папке, его достаточно выбрать в поле *Files* и нажать кнопку *Accept*. Иногда возникает следующая ситуация. Пользователь открывает рабочую папку, чтобы прочесть требуемый файл и не находит его там или вместо ожидаемой модели загружается старая версия и файл нужно обновить. В этом случае требуемый файл копируется в рабочую папку с другого места, флешнакопителя или других носителей обычными средствами *ОС Windows*. Для того, чтобы увидеть скопированный файл, в поле *Files* следует нажать кнопку *Filter*.

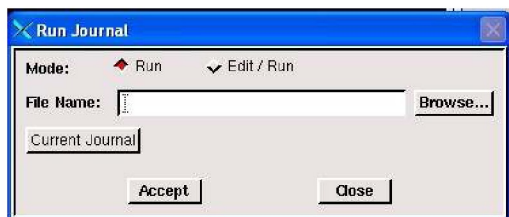


Рис. 1.10. Меню *Run Journal*



Рис. 1.9. Окно проводника выбора файлов

Если известен путь к требуемой папке, его можно внести в поле *Selection* и перейти туда нажатием кнопки *Filter*.

В случае если требуемый файл находится в другой папке, то следует поставить курсор на нее в левом поле и нажать кнопку *Filter*.

Для того, чтобы перейти на уровень ниже, в поле *Directories* следует поставить курсор на имя папки с двумя точками на конце (на рис.1.9 папка *D:\Fluent\.*) и нажать кнопку *Filter* (в рассматриваемом примере будут показываться файлы с путем *D:*).

1.1.2. Работа с журнальным файлом

Остановимся подробнее на работе с журнальным файлом. Он представляет собой текстовый файл с расширением **.jou*, который создается автоматически для каждой модели в момент работы с ней. В него автоматически записываются все действия, производимые с моделью. Доступ к журнальному файлу осуществляется с помощью команды: *File* → *Run Journal* (рис. 1.10). С ее помощью можно запустить существующий журнальный файл (с помощью кнопки *Run*) или редактировать его (кнопка

Edit/Run). Команды, записанные в журнальном файле, можно выполнить как «по шагам», так и целиком без остановок. В этом случае будут последовательно запущены все команды, записанные в нем.

Нажатие кнопки *Edit/Run* открывает доступ к окну редактирования журнала (рис 1.11). Работа с ним осуществляется следующим образом. Курсор ставится на нужную команду. При необходимости в рабочем окне могут быть изменены размеры или другие параметры, имена элементов, участвующих в операциях. Щелчком правой кнопки мыши открывается доступ к меню операций (выделить команду, снять выделение, переместить, редактировать и т.д.). Выбранные команды запускаются с помощью кнопки *Auto*.

На основе журнального файла можно создать параметрическую расчетную модель. Для этого в *.jou файле задается имя переменной, которое начинается со знака «\$». При необходимости в файл может быть добавлен комментарий, начинающийся со знака «/» (см. рис 1.12).

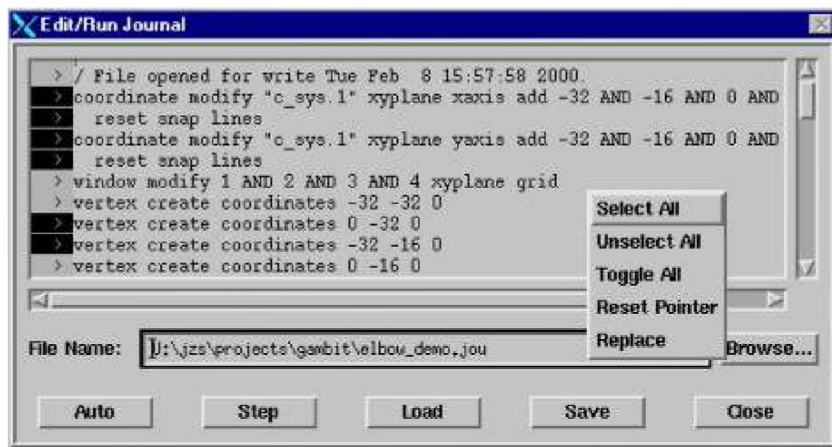


Рис 1.11. Меню редактирования журнального файла

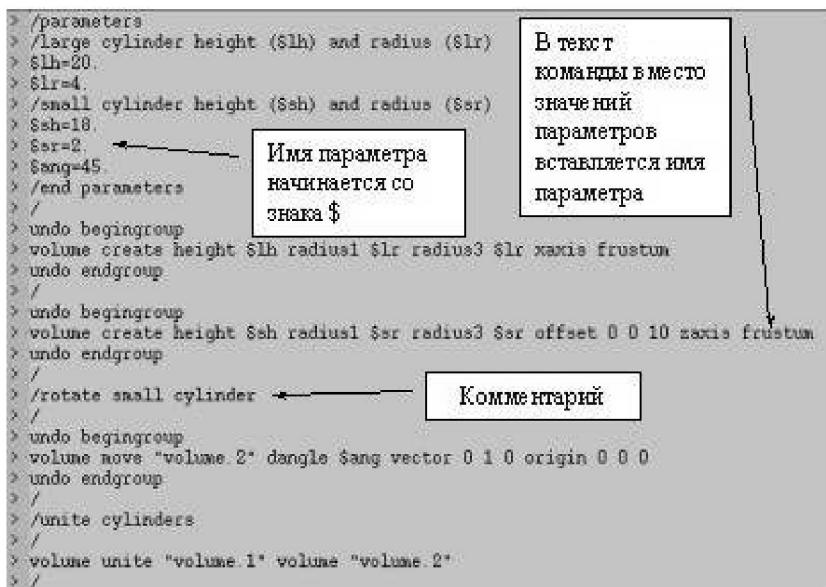


Рис 1.12. Параметризация модели с помощью журнального файла

1.1.3. Импорт геометрии и расчетных моделей в программу Gambit

Построение геометрии расчетной области и наложение на нее конечноэлементной сетки можно проводить двумя путями: строить их непосредственно в программе *Gambit* или импортировать из других *CAD/CAE* программ. Необходимость импортирования геометрии может быть продиктована невозможностью или трудностью построения сложных моделей в программе *Gambit*, возможности которой ограничены по сравнению с *CAD* программами. Кроме того, достаточно часто возникает необходимость рассчитать обтекание объекта, 3D модель которого была создана ранее в *CAD* пакете. В этом случае целесообразнее импортировать объект, чем строить его заново (правда, при условии приемлемого качества модели). С другой стороны создание модели от начала и до конца в *Gambit* позволяет избавиться от многих проблем, связанных с несовпадениями элементов или их совпадением.

В конечном итоге решение, где строить расчетную модель, в *Gambit* или в других программах принимает расчетчик в зависимости от своих

возможностей, предпочтений, требуемого времени, наличия задела работ по модели и других факторов.

В *Gambit* могут быть импортированы следующие форматы файлов геометрических моделей:

1. *ACIS* (расширение **.sat*) – бесплатный универсальный формат, версии *R8...R15*. Он предпочтителен для обмена моделями между разными CAD-системами.
2. *IGES* (**.igs; *.iges*) – один из первых универсальных векторных форматов. Он широко распространен и поддерживается всеми CAD программами, однако геометрия, импортированная в этом формате, имеет много несовпадений и элементов с одинаковыми координатами. После импортирования такие модели требуют большого объема обработки. Зачастую ее объем сопоставим с объемом работ по созданию модели «с нуля». Тем не менее, этот формат активно применяется, так как он является единственным, который позволяет импортировать двухмерную геометрию.
3. *STL* (**.stl*) – формат, используемый для передачи информации для станков с ЧПУ и стереолитографии.
4. *STEP* (**.stp*) – векторный формат для передачи 3d-моделей.
5. *Parasolid* (модели в текстовой **.x_t* и бинарной записи **.x_b* + параметрический файл **.sub*) – формат передачи 3d моделей. Этот формат импортируется в *Gambit* с минимальными ошибками, поэтому его следует использовать в случае, когда формат *ACIS* недоступен.
6. *CATIA 4, 5* (**.model; *.CATpart*) – форматы геометрии, используемые в программах *CATIA*.

Кроме перечисленных выше форматов передачи геометрии в программу *Gambit* можно импортировать параметрические (сеточные) модели из некоторых CAE – программ, например *Fluent 5, 6* (с расширением **.msh*) и *Ansys* (архивная модель с расширением **.cdb* + **.iges*).

Чтение импортируемой геометрии и сеток осуществляется в меню *File* → *Import*. В качестве иллюстрации на рис. 1.13 показано меню импортирования геометрии в формате *ACIS*. Работа с ним сложностей не представляет.

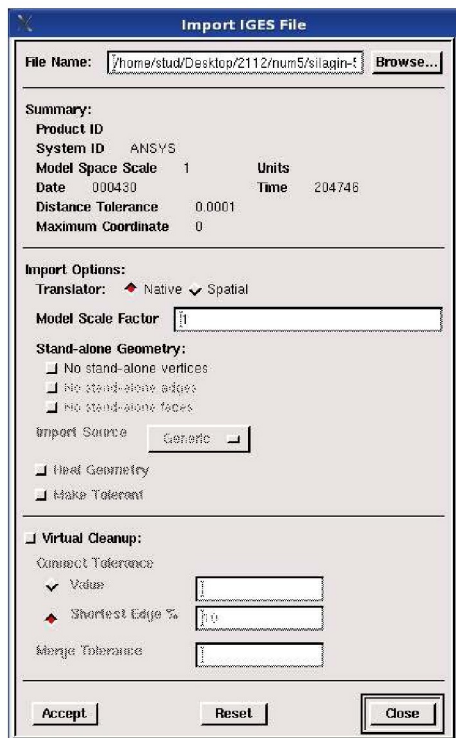


Рис. 1.14. Меню импортирования геометрии в формате IGES

к тому, что дуги и сплайны, содержащиеся в импортируемой геометрии, будут загружены. В противном случае они будут проигнорированы.

Поскольку разные форматы используют различные уравнения и способы описания геометрии, то импортированная геометрия достаточно часто содержит совпадающие элементы, или другие

В этом меню в поле *File Name* выбирается файл с загружаемой геометрией. В поле *Import Options* выбирается тип *ACIS* файла, в котором записана модель: текстовый или бинарный.

Аналогичным образом осуществляется работа с *IGES* моделями. Меню импортирования моделей в этом формате показано на рис. 1.14. Хотя в этом меню гораздо больше настроек, работа с ним аналогична работе с меню импорта моделей в формате *ACIS*. В большинстве случаев использование дополнительных настроек не требуется. Часто применяется лишь опция *Native/Spatial* в средней части меню. Ее активация приведет

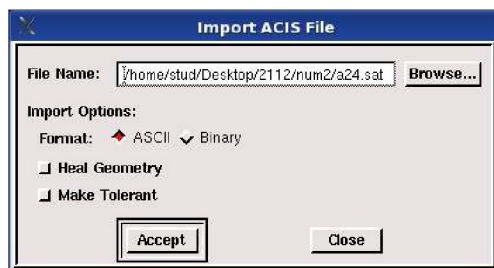


Рис. 1.13. Меню импортирования геометрии в формате ACIS

дефекты. Особенно много их встречается при импорте *IGES* моделей. Поэтому после загрузки файлов обмена рекомендуется с помощью команды *Connect* (см. п. 2.5) последовательно объединить совпадающие точки, линии и поверхности. Это заметно упростит дальнейшие операции с расчетной моделью.

Объединить совпадающие элементы можно при импорте геометрии. Для этого необходимо задаться величиной точности модели (*Tolerance*), которая измеряется в долях единицы длины. Эта величина показывает, что объекты, находящиеся друг относительно друга ближе, чем задано, будут считаться совпадающими. Для этого в поле *Virtual Cleanup* (нижняя часть меню на рис. 1.14) надо активировать опцию *Value* и в поле напротив нее внести желаемую величину точности.

1.1.4. Экспорт расчетных сеток и геометрии

После создания расчетной модели ее нужно передать в решающую программу (*Fluent*). Файл обмена между программами *Gambit* и *Fluent* имеет расширение **.msh*. Этот формат передает конечноэлементную сетку и наложенные на нее граничные условия. Геометрические объекты, не имеющие сетки, не передаются.

Для экспорта созданной модели в верхнем меню нужно выбрать следующие пункты: *File* → *Export* → *Mash*.

В появившемся окне нужно ввести имя файла обмена. По умолчанию оно совпадает с именем файла модели. С помощью кнопки *Browse* можно выбрать место, где файл необходимо сохранить. Если расчетная модель двухмерная, то обязательно следует активировать опцию *Export 2D (X-Y) Mash*. Запись файла обмена подтверждается нажатием кнопки *Accept*.

Если файл обмена был успешно записан, то в окне сообщений появится надпись *mash was successfully written to <имя файла>.msh*. В указанном месте появится файл *<имя файла>.msh*.

Аналогичным образом с помощью меню *File* → *Export* могут быть экспортированы геометрические объекты в форматах *ACIS*, *Parasolid*, *IGES*, *Step*, *Catia v.4* и др.

1.2. Кнопки управления видами

В правой нижней части окна программы *Gambit* имеется группа кнопок управления видами (рис. 1.2). Вид группы и назначение кнопок приведены на рис 1.15. Рассмотрим их подробнее.



Scale to Fit (1 на рис 1.15) – нажатие на данную кнопку корректирует положение модели в рабочем окне так, чтобы она занимала всю область построения модели.

	3. <i>Select present configuration</i> Группа кнопок управления видами	4. <i>Light source</i> Положение источника света	5. <i>Undo/Redo</i> Отмена/ повтор действия
8. <i>Wire frame, Shade, Hidden line</i> Управление видимостью элементов	9. <i>Colors coding</i> Кодировка цветом состояния объекта	10. <i>Examine mesh</i> Проверка качества сетки	

Рис. 1.15. Кнопки управления видами

	1. Scale to Fit Изображение модели во всю область построения	2. Select pivot Выбор точки, относительно которой происходит вращение модели
	6. Orient model Управление направлением взгляда на модель	7. Window Attributes Доступ к меню атрибутов

Группа меню *Select pivot* (2 на рис 1.15) определяет положение точки, относительно которой осуществляется вращение модели с помощью мыши. Переключение между способами задания центра осуществляется простым нажатием на указанную кнопку. Возможны два варианта положения центра вращения:



- в центре тела;



- в произвольной точке, указанной пользователем.

Группа меню *Select present configuration* (3 на рис 1.15) позволяет показать фронтальную, профильную и горизонтальную проекцию модели или ее изображение в изометрии. При необходимости три проекции модели и ее изометрическое изображение могут быть показаны вместе в



области построения модели с помощью кнопки

Группа меню *Light source* (4 на рис 1.15) содержит следующие команды:



- изменение положения источника света;



- добавление информации в существующие ярлыки;



- добавление стрелок и подписей в графическом окне.

Группа меню *Orient model* (6 на рис 1.15) открывает доступ к кнопкам управления направлением взгляда на модель. С их помощью можно

сориентировать взгляд, привязав его к координатным осям  (или другие кнопки, доступ к которым можно получить щелчком правой

кнопки мыши), просмотреть модель в изометрии , с обратной стороны



, вернуться к предыдущему взгляду  или к сохраненному в

журнальном файле .

Кнопка *Window Attributes*  (7 на рис 1.15) открывает доступ к меню атрибутов (рис. 1.16). Это меню часто применяется при работе с

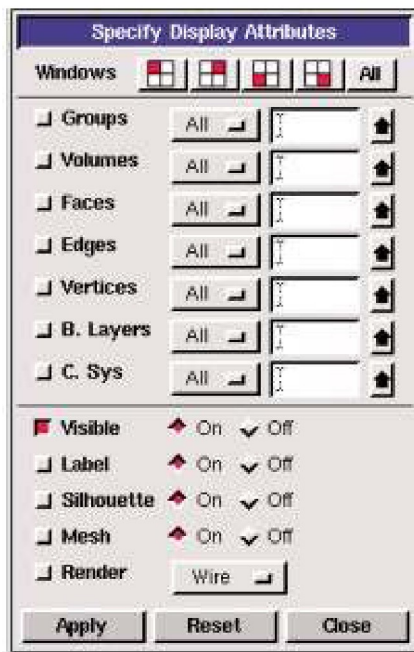


Рис 1.16. Меню атрибутов

большими и сложными моделями, состоящими из большого количества элементов. С его помощью можно:

- сделать видимой или невидимой конечноэлементную сетку;
- сделать видимыми или невидимыми имена элементов геометрии;
- сделать видимыми или невидимыми элементы геометрии (точки, грани, поверхности, объемы).

Как видно из рис 1.16 это меню условно можно разделить на две части: нижнюю и верхнюю. В нижней части выбирается действие над объектом (*Visible* – показать

объект; *Label* – показать название объекта; *Mesh* – показать сетку) и его текущее состояние (отобразить – *on* или скрыть – *off*). Например, активация пунктов *Visible* и *off* приводит к тому, что выбранные элементы будут сделаны невидимыми.

В верхней части меню выбирается объект, на который направлено действие (точки, линии, поверхности или объемы). При этом могут быть выбраны как все элементы (*All*), так и отдельные с помощью мыши (*Pick*). Для того, чтобы выбрать, например, поверхность необходимо поставить галочку напротив соответствующего пункта (*Face*) и выбрать нужные элементы. Выбранные элементы отображаются в списке, находящемся справа от выбранного пункта.

В третьей снизу позиции в блоке кнопок управления видами (8 на рис 1.15) находятся кнопки управления видимостью элементов. С их помощью

модель может быть отображена в виде твердого тела , каркаса 

или со скрытыми невидимыми линиями . Действия этих команд понятны из пиктограмм на кнопках.

В правой части верхнего ряда блока кнопок управления видами находятся кнопка *отмены действий (Undo)*  (5 на рис 1.15). Она позволяет отменить последние 10 операций, которые были выполнены после последнего сохранения модели. Щелчок правой клавишей на этой кнопке откроет доступ к кнопке «повтор/Redo» .

Кнопка *Examine mesh*  (10 на рис 1.15) открывает доступ к меню качества сетки. Оно будет рассмотрено ниже.

1.3. Использование мыши в программе *Gambit*

При построении расчетной модели в программе *Gambit* активно используется трехкнопочная мышь. Операции, выполняемые с помощью мыши, перечислены в табл. 1.1.

Внимание! Выбор объекта мышью в программе *Gambit* осуществляется при нажатой клавише *Shift*.

1.4. Типовая структура меню программы *Gambit*

Все меню в программе *Gambit* имеют схожую структуру, что облегчает работу с программой и ускоряет ее освоение. Типовой вид меню программы приведен на рис. 1.17.

Таблица 1.1.

Операции, выполняемые с помощью мыши

Клавиша	левая	средняя	правая
Действие			
Движение с нажатой клавишей	Вращение модели	Сдвиг модели	Приближение, удаление + вращение вокруг оси z
Действие с нажатой клавишей Shift	Выделение	Следующий объект	Заменяет кнопку Apply и Ok
Двойной щелчок	-	Предыдущий вид	Сохранить вид в журнал
Движение с нажатой клавишей Ctrl	Увеличение элементов с помощью рамки	Увеличение элементов с помощью рамки	-

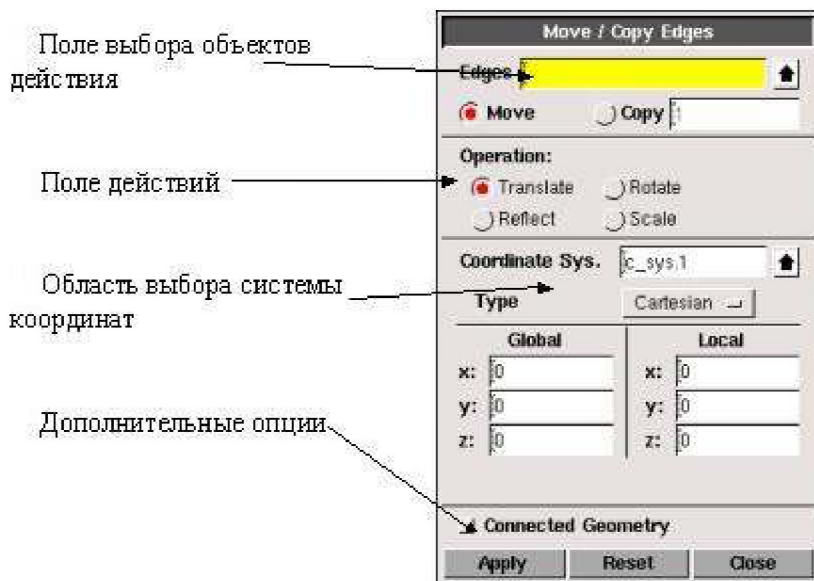


Рис 1.17. Типовой вид меню программы Gambit

Активное в настоящий момент времени поле, в котором можно осуществить выбор элемента или ввод числового значения параметра, выделяется желтым цветом. Чтобы сделать его активным, необходимо щелкнуть на нем левой клавишей мыши.

В верхней части меню (рис. 1.17), как правило, находится поле, в котором указываются объекты, над которыми будет осуществляться действия команды. Выбор объектов в программе *Gambit* может осуществляться щелчком левой клавиши мыши (с одновременно нажатой кнопкой *Shift*) или из списка элементов данного типа, если известны их названия. Доступ к списку можно получить, нажав кнопку в виде стрелки, справа от поля (рис. 1.18). С его помощью также можно удалить ошибочно выбранные объекты.

Под полем выбора действий часто находится область задания системы координат (рис. 1.17). Она состоит из трех основных элементов. В верхней части находится окно выбора СК. По умолчанию там выбрана глобальная СК. Если в процессе работы с моделью будут созданы другие системы (см. п. 2.8), они могут быть выбраны в данном поле. Ниже находится список выбора типа координат: Декартовы (*Cartesian*), цилиндрические (*Cylindrical*) или сферические (*Spherical*). Еще ниже находятся две таблицы для ввода координат. Левая - предназначена для ввода координат в глобальной СК. Правая - в локальной. При вводе координат в одной системе автоматически вычисляются координаты в другой СК и приводятся в соответствующих полях.

1.5. Задание осей вращения и векторов в программе *Gambit*

Одной из типовых операций при построении и редактировании геометрии

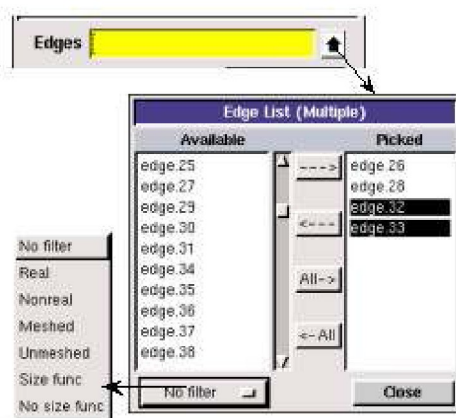


Рис. 1.18. Меню выбора элементов из списка

в программе *Gambit* является описание осей вращения или векторов. Ось вращения используется при копировании элементов по окружности, создании объекта вращением и т.п. Векторы применяются при проецировании одного элемента на другой или создании объекта вытягиванием в некотором направлении. Вызов меню описания оси вращения/ вектора осуществляется нажатием кнопки *Define* в окне соответствующей команды (например, рис. 2.10).

Внешний вид меню описания оси вращения и задания вектора не отличаются и показан на рис. 1.19.

Ось вращения или вектор могут быть заданы одним из следующих способов:

- одной из координатных осей глобальной или локальной СК (*Coord. Sys. Axis*);
- двумя существующими точками (*2 Vertices*);
- двумя точками, задаваемыми координатами (*2 points*);
- линией (*edge*).

Выбор способа описания оси/вектора осуществляется в списке *Method*.

Внешний вид меню описания оси с помощью координатных осей показан на рис. 1.19. В нижней части меню следует выбрать СК (в поле *Coordinate Sys.*). А в поле ниже одну из осей (x, y или z). Здесь также имеется возможность выбрать направление оси (положительное или отрицательное). Оно определяет направление вращения объекта (в командах, связанных с перемещениями объекта вокруг оси) в соответствии с правилом «буравчика».

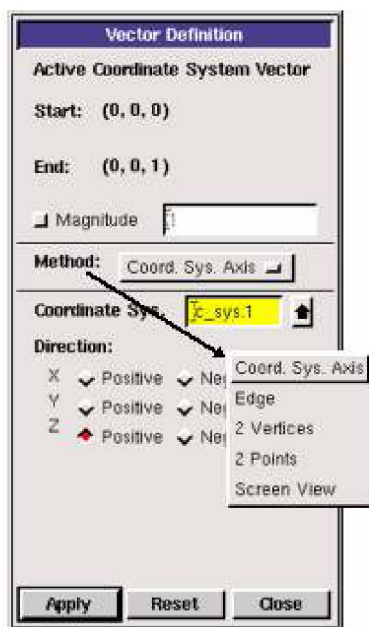


Рис. 1.19. Меню определения оси вращения (вектора) с помощью координатных осей

Если с помощью данной команды описывается вектор, то подобным образом задается единичный вектор, направление которого совпадает с направлением выбранной оси. Однако часто требуется задать вектор определенной длины. В этом случае следует активировать опцию *Magnitude* и в поле правее ее ввести требуемую длину вектора.

Внешний вид части меню описания оси с помощью двух существующих точек показан на рис. 1.20. В нем в поле *Vertices* выбирается начальная (*Start*) и конечная (*End*) точка. В случае, если поворот вокруг заданной подобным образом оси будет проводиться в сторону, противоположную требуемой, то начальную и конечную точку нужно поменять местами.

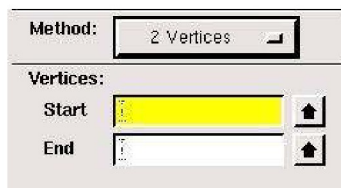


Рис. 1.20. Нижняя часть меню определения оси вращения (вектора) с помощью двух существующих точек

Внешний вид части меню описания оси с помощью двух точек, задаваемых координатами, показан на рис. 1.21. В этом меню следует нажать кнопку *Point 1* и задать координаты первой точки, принадлежащей оси. Как это сделать описано в п. 2.1.1. Затем следует нажать кнопку *Point 2* и ввести координаты второй точки.

Внешний вид части меню описания оси с помощью линии показан на рис. 1.22. В нем в поле *Edge* выбирается ось вращения. Обратите внимание на то, что на выбранной линии стрелкой указывается направление, которое задает направление вращения. Если щелкнуть на уже выбранном отрезке средней клавишей мыши с нажатой клавишей *Shift*, то направление сменится на противоположное.

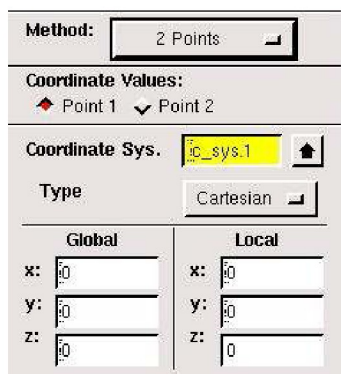


Рис. 1.21. Нижняя часть меню определения оси вращения (вектора) с помощью двух точек, задаваемых координатами

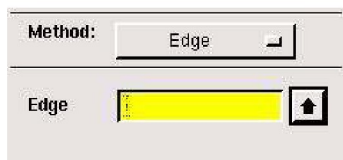


Рис. 1.22. Нижняя часть меню
определения оси вращения
(вектора) с помощью линии

2. СОЗДАНИЕ И РЕДАКТИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ В ПРОГРАММЕ *GAMBIT*

Программа *Gambit* имеет развитые средства построения геометрии расчетной области, позволяющие строить модели произвольной конфигурации.

Все элементы геометрии, используемые при построении моделей в программе *Gambit*, могут быть разделены на пять групп. Каждая из них по умолчанию имеет свой цвет:

- Точка (*Vertex*) - белый;
- Линия (*Edge*) - желтый;
- Поверхность (*Face*) – светло голубой;
- Объем (*Volume*) - зеленый;
- Группа (*Group*) – темно зеленый.

Элементы геометрии имеет строгую иерархию. Точки являются низшим элементом. На их основе строится линия, которая является элементом второго уровня. Она представляет собой основу для построения поверхности – элемента третьего уровня. Поверхности образуют объем – четвертый уровень. Объемы могут быть собраны в группы – это пятый, высший уровень геометрии в программе.

При создании объекта все элементы низшего уровня, входящие в него, меняют свой цвет на соответствующий построенному. Например, точка при построении линии на ее базе меняет цвет на желтый, соответствующий линии. При необходимости, цвет, установленный для элементов по умолчанию, может быть изменен в меню *BM:Edit→Defaults*.

Для корректной оценки процессов, происходящих в потоке, необходимо, чтобы расчетная модель была трехмерной. Однако в случаях простых течений, малых ресурсов вычислительной техники или при необходимости получения быстрого решения, для которого не важна

точность, можно применять двухмерные расчетные модели. Иногда для упрощения задачи и снижения требуемых ресурсов и времени счета можно упростить задачу за счет применения ГУ симметрии и периодичности. Возможность их применения определяется конфигурацией рассматриваемой области потока.

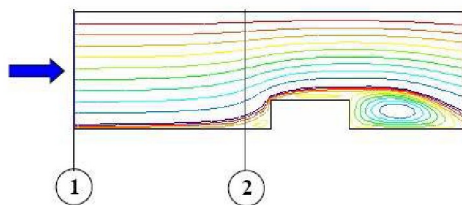


Рис. 2.1. Различные положения входной границы

Особенностью программы *Gambit* является то, что вся геометрия делится на две группы: реальную и виртуальную. Реальной геометрией называется геометрия, удовлетворяющая стандарту *ACIS*. Геометрия, созданная средствами программы *Gambit* и не удовлетворяющая стандарту *ACIS* называется виртуальной. Чаще всего она возникает при выполнении операций объединения разных элементов в один. Программа *Gambit* одинаково хорошо работает с геометрией обоих типов. Однако ряд команд не может быть выполнен с виртуальной геометрией. Кроме того, в ряде случаев возможно заметное искажение контуров виртуальных элементов. Во многих случаях виртуальную геометрию можно конвертировать в реальную с помощью команды *Convert* , находящейся в центре нижнего ряда меню операций с элементами геометрии. Искажение контуров при этом сохраняется.

Процесс наложения конечноэлементной сетки на разные типы геометрии выполняется одинаково. Сложностей с разбиением виртуальной геометрии замечено не было.

Расчетная модель для исследования течения жидкости и газа должна включать не только область течения, но достаточно большие входные и выходные участки. Их необходимость обусловлена тем, что эпюры распределения параметров на входе (выходе) в канал или вблизи обтекаемого тела, как правило, неизвестны. Задание равномерных или существенно отличающихся от действительности полей параметров значительно снижает точность расчета и изменяет картину течения.

Пристройка выходной области дает возможность учесть влияние возмущений за обтекаемым телом на течение в расчетной области. При построении входного и выходного участков не следует располагать границу в местах с возможными большими градиентами изменения параметров (рис 2.1, позиция 2). Место для нее следует выбирать там, где поля распределения параметров равномерны (рис 2.1, позиция 1). Удаленность входной и выходной границ от обтекаемого объекта, как правило, зависит от решаемой задачи и должно быть не менее нескольких калибров.

В качестве примера на рис 2.2 показана расчетная область для расчета течения в межлопаточном канале турбины. Как видно, она содержит не только сам канал, но и значительные входные и выходные области, удаленные от кромок лопаток на величину не менее шага решетки.

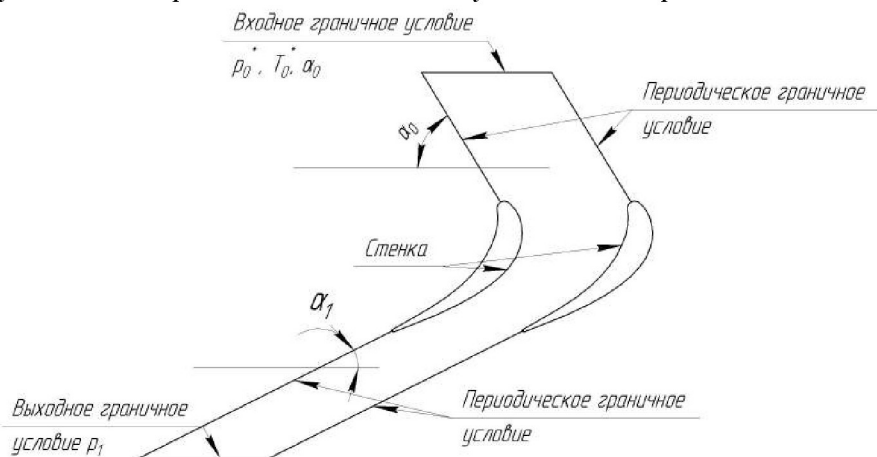


Рис. 2.2 Схема расчетной модели для исследования течения газа в элементарном венце турбины

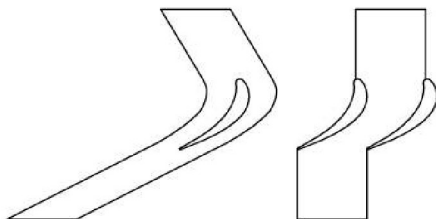


Рис. 2.3. Возможные формы расчетной модели потока газа

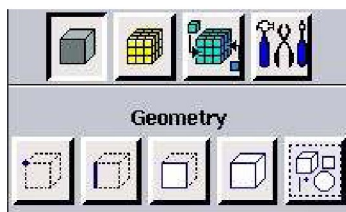


Рис. 2.4. Меню построения геометрии

Следует отметить, что конфигурация расчетной области (например, представленная на рис. 2.2) не является единственной. Расчетная область может иметь различные формы, причем точность расчета от

нее мало зависит. Некоторые из возможных форм расчетной области потока в решетке профилей турбины показаны на рис. 2.3.

Меню операций с геометрией в программе *Gambit* (рис. 2.4) вы-

зывается нажатием кнопки  в главном меню. В нем располагаются

кнопки доступа к командам работы с точками , линиями , поверхностями , объемам  и группами .

Типичная структура меню операций с элементами геометрии показана на рис. 2.5 на примере меню *Face* (поверхности). Как видно, оно состоит из кнопок, открывающих доступ к подменю соответствующих команд. Их содержание показано на рис. 2.5.

Рассмотри основные группы меню подробнее.

2.1. Построение элементов геометрии

Доступ к подменю построения объекта осуществляется нажатием левой верхней кнопки в соответствующем меню операций с элементами геометрии (1 на рис. 2.5). В этой позиции находится семейство команд построения элементов, различающихся принципом создания объектов. Доступ к ним осуществляется нажатием правой кнопкой мыши.

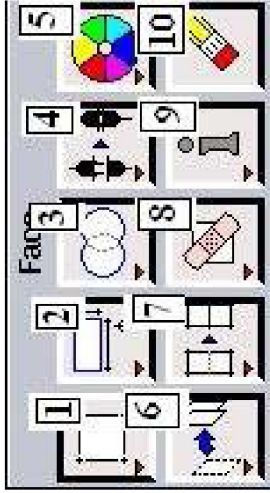
				
1. Группа команд построения элемента	2. Группа команд построения примитивной геометрии	3. Группа команд булевых операций (сложение, вычитание, объединение)	4. Группа команд объединения/разъединения совпадающих элементов	5. Группа команд редактирования атрибутов геометрических объектов
6. Группа команд редактирования элемента (перенос, копирование, масштабирование и т.п.)	7. Группа команд разделения/объединения элементов	8. Группа команд исправления геометрии	9. Группа команд получения информации об объекте	10. Удаление объекта

Рис 2.5. Типичная структура меню операций с элементами геометрии

2.1.1. Построение точек

Построение точек в программе *Gambit* осуществляется в подменю работы с точками . Точка является низшим элементом геометрии и может быть построена следующими способами.

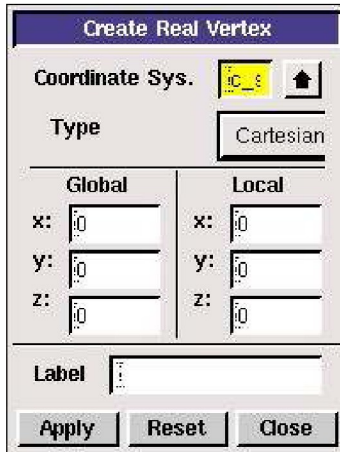


Рис 2.6. Меню команды построения точек по координатам

Local, будут автоматически пересчитаны в глобальной и появятся в поле *Global* и наоборот.

1. По координатам . Это наиболее часто применяемый способ создания точек. Меню команды построения точек по координатам показано на рис. 2.6.

В нем, в поле *Coordinate Sys.*, выбирается СК, в которой будут вводиться координаты точки. Система может быть декартовой (*Cartesian*), цилиндрической (*Cylindrical*) или сферической (*Spherical*). В поле *Global* вводятся координаты в глобальной СК. В качестве альтернативы в поле *Local* могут быть введены координаты в локальной системе. Причем координаты, вводимые в одной локальной СК в поле

2. Построение точки на линии . Эта команда позволяет создать точку на линии, задав ее координаты или отношение, в котором она делит отрезок (в поле *U value*). Построенная точка не делит линию на части.

3. Построение точки, лежащей на поверхности . Этот способ схож с предыдущим и применяется в основном для построения вспомогательных точек, которые в дальнейшем будут использоваться при разделении поверхности на части.

4. Построение точки, лежащей в

объеме . Этот способ похож на предыдущие два. Применяется редко.

5. Построение точки в месте

пересечения двух линий . Меню этой команды показано на рис 2.7. Работа в нем не сложна и заключается в выборе двух пересекающихся линий в полях *Edge1* и *Edge 2*. Полученная точка не делит исходные линии на части.

6. Построение точки в центре

объема 

7. Построение новой точки проектированием существующей на

линию 

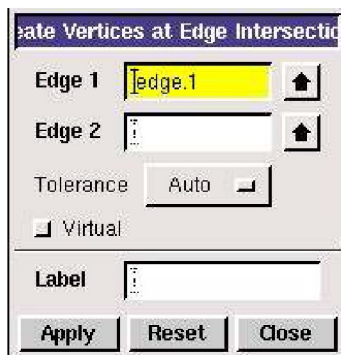


Рис. 2.7. Меню команды построения точек на пересечении двух линий

2.1.2. Построение линий

Построение линий в программе *Gambit* осуществляются в подменю работы с линиями  с помощью команд, доступ к которым осуществляется нажатием одной из кнопок, находящихся в верхней левой позиции (1 на рис 2.5). Линии могут быть построены следующими способами.

1. Построение линии по суще-

ствующим точкам . Меню этой команды показано на рис. 2.8. В этом меню в поле *Vertices* выбираются точки, являющиеся концами отрезка. Число точек может быть любым, что позволяет с помощью данной команды строить ломанные. Однако, точка

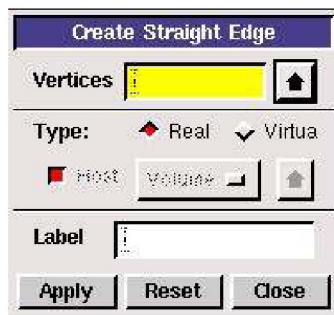


Рис. 2.8. Меню команды построения линии по существующим точкам

может быть выбрана только один раз, поэтому ломанную нельзя замкнуть. Полученная линия может быть как виртуальной, так и реальной. Выбор типа геометрии осуществляется активацией соответствующей опции. По умолчанию это *Real* (реальная геометрия).

Построение запускается нажатием кнопки *Apply*.

2. Построение дуги  **или окружности**  Меню построения дуги приведено на рис. 2.9. Меню построения окружности выглядит аналогично. Эти элементы могут быть построены следующими способами:

- по двум точкам и центру дуги/окружности (1 на рис. 2.9);
- по трем точкам на окружности/дуге (2 на рис. 2.9).

Кроме того, дуга может быть построена по двум углам и радиусу (3 на рис. 2.9).



Рис. 2.9. Меню команды построения дуг

Center выбирается точка центра окружности, а в поле *End-Points* – концы дуги (рис. 2.9).

3. Построение дуги вращением точки относительно произвольной оси  Меню этой команды показано на рис. 2.10. В нем в поле *Vertices* задается исходная (вращаемая) точка. В поле *Angle* вводится угол поворота. Ось вращения определяется в меню, доступ к которому осуществляется нажатием кнопки *Define* в поле *Axis* (подробнее об описании осей в *Gambit* см. п. 1.5).

4. Кроме обычной дуги в программе *Gambit* могут быть также построены *конические*  и *эллиптические*  дуги.

5. **Построение сплайна**, описываемого уравнением третьего порядка с помощью команды *Nurbs* . Ее меню показано рис. 2.11. В нем, в поле *Vertices* последовательно выбираются точки, принадлежащие сплайну. Построение линии запускается нажатием кнопки *Apply*.

6. **Скругление угла**, образованного двумя приходящими в точку линиями, осуществляется с помощью команды *Fillet Arc* . Ее меню показано на рис. 2.12. Ее действие показано на рис. 2.13. В поле *Edge 1* выбирается одна линия, образующая угол, в поле *Edge 2* – другая. В поле *Radius* вводится радиус скругления. Если в указанном меню кнопку *Trim edges* оставить не нажатой, то линии, образующие угол, будут сохранены.

7. **Построение линии движением точки по направляющей** . В качестве направляющей может быть использована существующая линия любой конфигурации (*Edge*) или вектор (*Vector*). Меню команды показано на рис. 2.14. Меню описания вектора появится после нажатия кнопки *Define* (появится после нажатия кнопки *Vector*). Как задать вектор подробно описано в п.1.5. Направляющая линия может находиться в любом месте пространства.

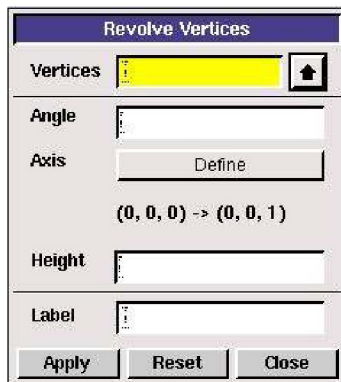


Рис. 2.10. Меню команды построения дуги вращением точки относительно оси

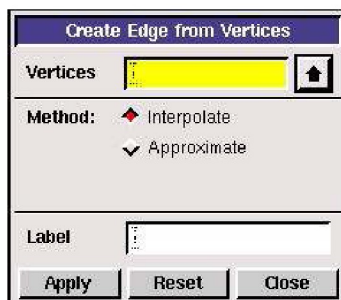


Рис. 2.11. Меню команды построения сплайна

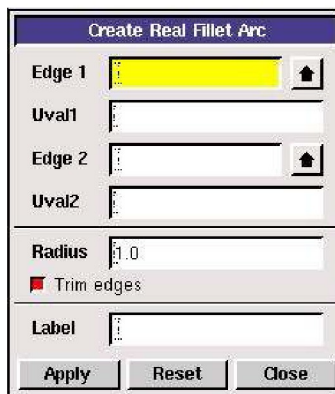


Рис. 2.12. Меню команды скругления углов (*Fillet Arc*)

осуществляется проецирование. Если активна опция *Closest distance*, то проецирование будет осуществлено по кратчайшему пути. Если выбрать опцию *Direction*, то направление проецирования будет определяться вектором, который предварительно нужно описать (см. п.1.5). Если активировать опцию *Split face*, то плоскость, на которую осуществляется проецирование, будет поде-

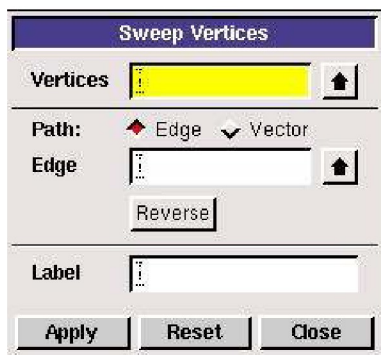


Рис. 2.14. Меню команды построения линии движением точки по направляющей

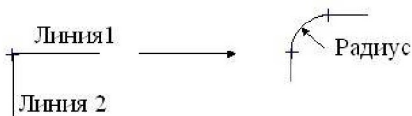


Рис. 2.13. Действие команды *Fillet Arc*

8. Проецирование существующей

линии на поверхность



Меню команды показано на рис. 2.15, а ее действие на рис. 2.16. В меню в поле *Edges* выбираются проецируемые линии, в поле *Face* – поверхность, на которую

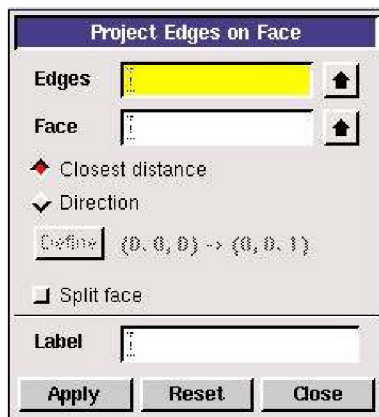


Рис. 2.15. Меню команды проецирования линии на поверхность

лена на части линией проекции.

2.1.3. Построение поверхностей

Построение поверхностей в программе *Gambit* осуществляется в подменю

работы с поверхностями  с помощью команд, доступ к которым осуществляется нажатием одной из кнопок, находящихся в верхней левой позиции (1 на рис 2.5). Поверхности могут быть построены следующими способами.

1. По замкнутому контуру линий



При данном способе построения в меню в поле Edges необходимо выбрать все линии образующие контур поверхности. Контур обязательно должен быть замкнут. Порядок выбора линий значения не имеет. Линии не должны пересекаться. В случае если они компланарны, то число линий, составляющих замкнутый контур, может быть любым. Если линии не компланарны, число линий не должно превышать четырех.

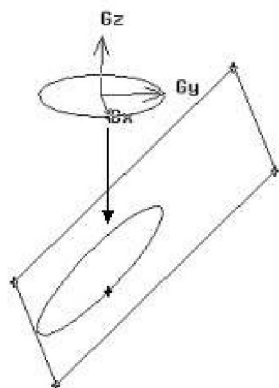


Рис. 2.16. Действие команды проецирования линии на поверхность

2. Построение параллелограмма по трем точкам . Действие команды показано на рис 2.17.

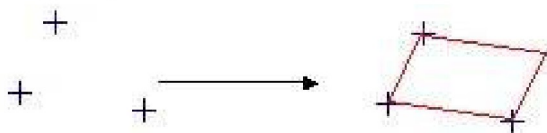


Рис. 2.17. Построение параллелограмма по трем точкам

3. Построение многоугольника по существующим точкам . При построении поверхности таким способом важен порядок выбора точек. Они выбираются строго последовательно по или против часовой стрелки. Точки, по которым строится многоугольник, должны принадлежать одной плоскости. Действие команды показано на рис. 2.18.

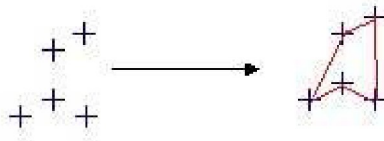


Рис. 2.18. Построение многоугольника по точкам

4. **По рядам точек** . Действие команды показано на рис. 2.19.

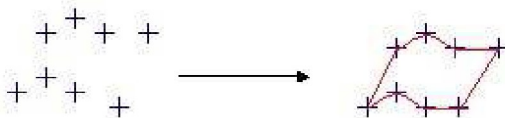


Рис. 2.19. Построение поверхности по рядам точек

5. **По линиям** . Действие команды показано на рис. 2.20. Линии, по которым строится поверхность, должны быть параллельны. Выбор линий обязательно осуществляется в последовательном порядке.

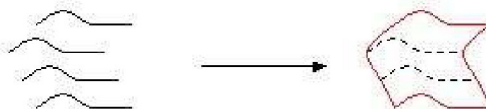


Рис. 2.20. Построение поверхности по линиям

6. **По сетке линий** . Действие команды показано на рис. 2.21. Линии, образующие поверхность, должны пересекаться.



Рис. 2.21. Построение поверхности по сетке линий

7. **Построение поверхности вращением линии вокруг выбранной**

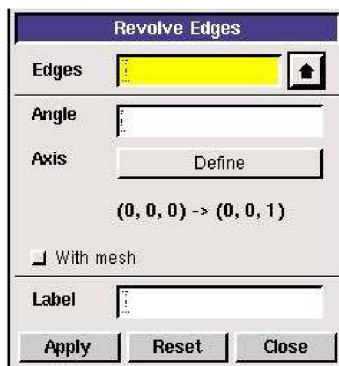


Рис. 2.22. Меню команды построения поверхности вращением линии вокруг оси

оси . Меню команды показано на рис. 2.22. В нем выбирается исходная линия (в поле *Edges*), угол поворота (*Angle*) и определяется ось вращения (*Axis*), подобно тому, как это было описано в п. 1.5.

8. Построение поверхности движением существующей линии

. Меню команды показано на рис. 2.23. Ее действие показано на рис. 2.24. Поверхность может быть получена движением вдоль существующей линии или вектора. При этом направляющая и перемещаемая линии могут находиться в любом месте расчетной области. Линия, которая будет двигаться вдоль направляющей, выбирается в поле 1 (рис. 2.23). В поле *Path 2* (рис. 2.23) происходит выбор типа направляющей: линия (*Edge*) или вектор (*Vector*). В случае выбора линии, в нижнем поле *Edge 3* (рис. 2.23) выбирается направляющая. При задании вектора на этом месте появится кнопка *Define*, которая открывает доступ к меню определения вектора, подробно описанном в п. 1.5. При движении линии вдоль направляющей первая из них может вращаться относительно второй. В этом случае получается скрученная поверхность. Чтобы задать движение линии с поворотом в поле *Option* (4 на рис. 2.23) нужно выбрать опцию *Twist* и ввести значение угла поворота в поле *Angle*.

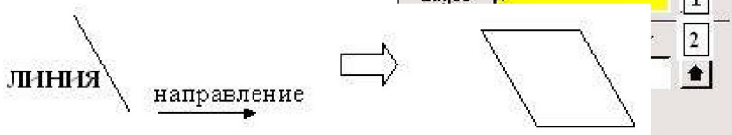


Рис. 2.24. Действие команды построения поверхности движением линии по направляющей

9. Построение круга осуществляется с помощью команды

Круг может быть построен по трем точкам на окружности или двум точкам и радиусу. Внешний вид меню построения кругов и работа с ним схожи с меню построения дуг и окружностей, рассмотренными в предыдущем разделе.

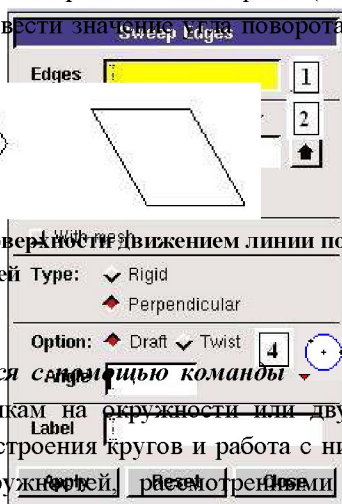


Рис. 2.23. Меню команды

Кроме перечисленных выше способов построения поверхности предусмотрены специальные команды построения примитивных направляющей

двухмерных объектов: прямоугольника , круга , эллипса . Доступ к ним осуществляется нажатием второй кнопки слева в верхнем ряду в меню операций с поверхностями (2 на рис. 2.5). Работа с этими командами сложностей не представляет.

2.1.4. Построение объемов

Построение объемов в программе *Gambit* осуществляются в подменю работы с объемами  с помощью команд, доступ к которым осуществляется нажатием одной из кнопок, находящихся в верхней левой позиции (1 на рис. 2.5). В программе *Gambit* применяется четыре способа построения объемов. Рассмотрим их вкратце.

1. Построение объема по ограничивающим его поверхностям

Меню команды показано на рис. 2.25. Работа с ним несложна: в поле *Faces* выбираются поверхности, образующие замкнутый объем. Команда запускается кнопкой *Apply*. Порядок выбора поверхностей значения не имеет. Выбранные поверхности должны образовывать замкнутый объем.

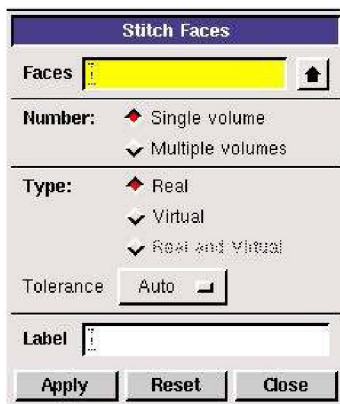


Рис. 2.25. Меню команды построения объема по ограничивающим поверхностям

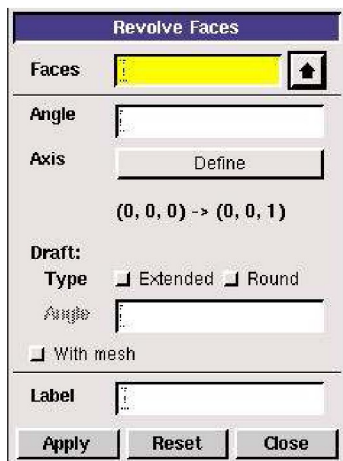


Рис. 2.26. Меню команды построения объема вращением поверхности вокруг оси

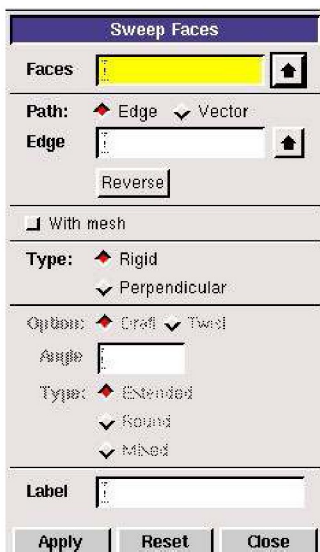
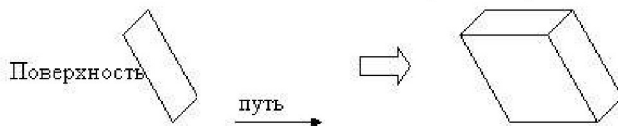


Рис. 2.28. Меню команды построения объема движением поверхности вдоль направляющей

вектора  . Меню команды показано на рис. 2.28. Работа с ним подобна работе с меню команды построения поверхности движением линии вдоль направляющей, описанной выше. Действие команды показано на рис. 2.29.

4. Построение объема по граням  . Линии, ограничивающие объем и являющиеся каркасом его граней, должны иметь общие точки. Число линий может быть любым. Действия команды показано на рис. 2.30.

Кроме перечисленных выше способов создания объемов в программе *Gambit* имеются дополнительно команды построения примитивных фигур.



2. Построение объема вращением существующей поверхности вокруг

выбранной оси  . Меню команды показано на рис. 2.26. Для построения объема в поле *Faces* выбирается исходная поверхность – источник, в поле *Angle* вводится угол поворота и определяется ось вращения (см. п. 1.5). Действие команды показано на рис. 2.27.

3. Построение объема движением поверхности вдоль выбранной линии или

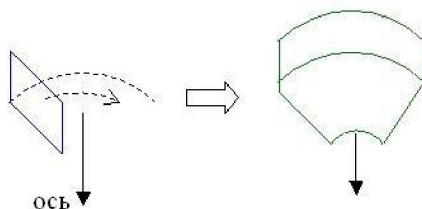


Рис. 2.27. Действие команды построения объема вращением поверхности вокруг

Рис. 2.29. Действие команды построения объема движением поверхности вдоль направляющей

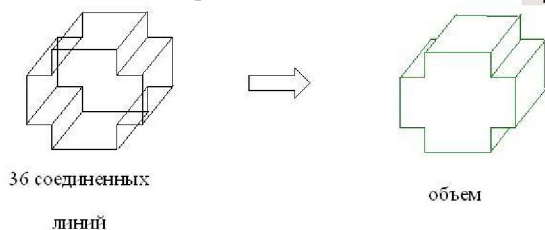


Рис. 2.30. Действие команды построения объема по ограничивающим линиям

Доступ к командам построения примитивной геометрии осуществляется нажатием второй кнопки слева в верхнем ряду в меню операций с объемами (2 на рис. 2.5). Работа в меню команд построения простых фигур сложности не представляет. В качестве примера на рис. 2.31 приведено меню команды построения прямоугольного параллелепипеда . В этом меню в поле *Direction* задается положение параллелепипеда относительно системы координат.

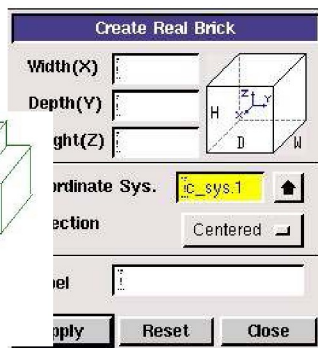


Рис. 2.31. Меню команды построения прямоугольного параллелепипеда

Кроме прямоугольного параллелепипеда возможно построение цилиндра , пирамиды , усеченного конуса , призмы , сферы , тора .

2.2. Перемещение и копирование элементов геометрии

При построении расчетной области часто возникает необходимость перемещения, копирования, масштабирования и других действий над существующими геометрическими объектами. Рассмотрим как они осуществляются в программе *Gambit*.

2.2.1. Перемещение и копирование элементов геометрии с помощью команды *move/copy*

Основной командой редактирования графических элементов в программе

является команда *move/copy* , кнопка которой находится в левой нижней позиции меню в меню операций с элементами геометрии (6 на рис. 2.5).

Внешний вид меню *move/copy* показан на рис. 2.32. Оно имеет вид одинаковый для всех элементов геометрии. С помощью этой команды можно перемещать (*move*) или копировать объект (*copy*) одним из четырех способов:

- линейным перемещением (*Translate*);
- вращением вокруг выбранной оси (*Rotate*);
- масштабированием (*Scale*);
- зеркальным отражением относительно выбранной плоскости (*Reflect*).

Результат действий команды *move/copy* показан на рис. 2.33.

Выбор действия над объектом (перемещение или копирование) определяется выбором соответствующей опции в верхней части меню. В поле *Operation* выбирается один из четырех способов трансформации объекта.

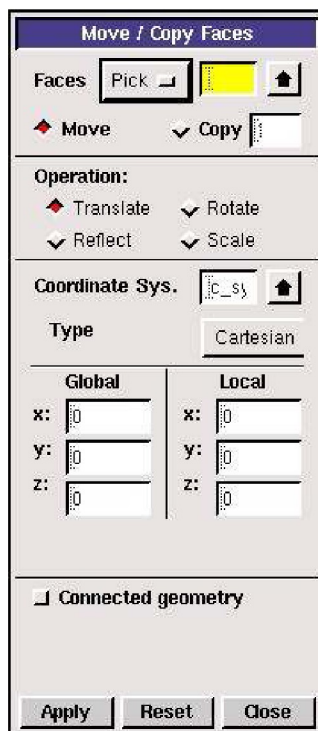


Рис. 2.32. Меню редактирования геометрии

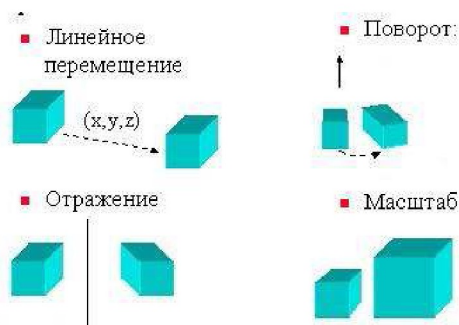


Рис. 2.33. Действия над объектами геометрии, выполняемые с помощью команды *move/copy*

Ниже находится область меню, в которой определяются конкретные параметры копирования/перемещения. Ее содержание зависит от выбранного способа трансформации элемента. В частности на рис. 2.32 показан внешний вид меню для случая линейного копирования/перемещения. В нем в нижней части меню следует выбрать СК и ввести величину смещения вдоль требуемой оси.

При копировании/перемещении объекта по окружности в средней части меню появится поле *Angle*, в которой следует ввести угол поворота, и кнопка *Define*, за которой скрывается меню определения оси вращения, подробно описанное в п. 1.5.

Если элемент геометрии необходимо зеркально отобразить относительно плоскости, то после выбора опции *Reflect*, в средней части меню появится кнопка *Define*. За ней скрывается меню описания вектора, нормального к отражающей поверхности. Процесс описания вектора приведен в п.1.5.

2.2.2. Перемещение элементов геометрии с помощью команды *Align*

Альтернативой команды *move/copy*

является команда *Align*  (рис. 2.34). Она также позволяет перемещать, вращать геометрические объекты, но в основе имеет другой принцип трансформации. Перемещение

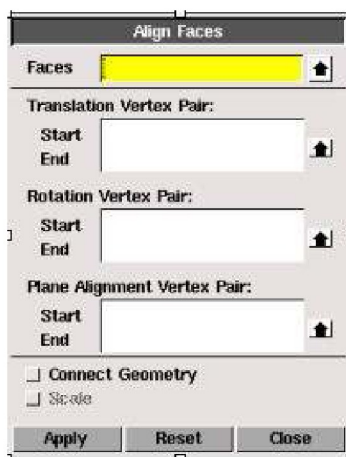


Рис 2.34 Меню *Align*

элементов осуществляется за счет указания базовых точек в качестве начального и конечного положения объекта. Действие команды проиллюстрировано на рис. 2.35.

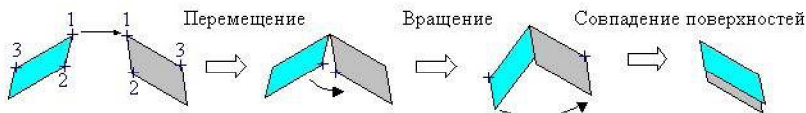


Рис. 2.35. Действие команды *Align*

2.3. Сложение, вычитание и пересечение объемов и поверхностей

Другим методом, часто применяемым при построении расчетной области сложной конфигурации, являются булевы операции: сложение, вычитание и пересечение. Они доступны только для поверхностей и объемов.

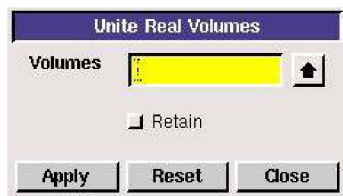


Рис. 2.36. Меню сложения объектов

Доступ к булевым операциям осуществляется нажатием третьей слева кнопки в верхнем ряду в меню операций с элементами геометрии (3 на рис. 2.5).

Команда сложения позволяет получить один общий элемент геометрии, содержащий все точки

слагаемых. Меню сложения элементов (рис. 2.36) вызывается нажатием



кнопки. С помощью данной команды создается один объект, который содержит области пространства, входящие во все слагаемые элементы. Число складываемых объектов может быть любым. Действие команды показано на рис. 2.37.

Исходные элементы, участвующие в операции сложения, удаляются. Однако, если в меню сложения (рис. 2.36) нажать кнопку *Retain*, исходные объекты будут сохранены.

Команда вычитания элемента *A* из элемента *B* позволяет получить объект, содержащий ту часть объекта *A*, которая не является общей с объектом *B*.

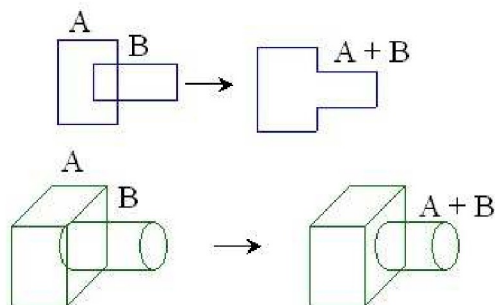


Рис. 2.37. Сложение элементов

Меню вычитания элементов

вызывается нажатием кнопки . Его внешний вид показан на рис. 2.38. В этом меню в поле 1 указывается элемент, из которого осуществляется вычитание, а в поле 2 – вычитаемый объект. Нажатие кнопки *Retain* в меню позволяет сохранить копию исходных элементов, участвующих в операции вычитания. Действие команды показано на рис.2.39.

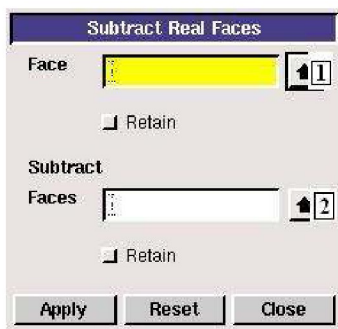


Рис. 2.38. Меню команды вычитания элементов

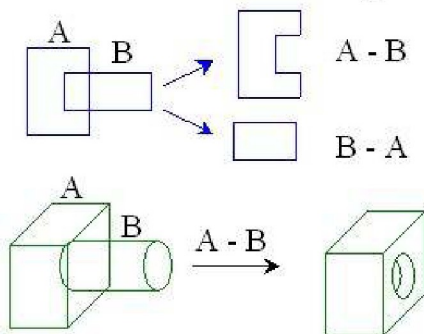


Рис. 2.39. Вычитания элементов

Команда пересечения элементов A и B позволяет получить объект, являющийся общим для данных элементов. Действие команды показано на рис.2.40.

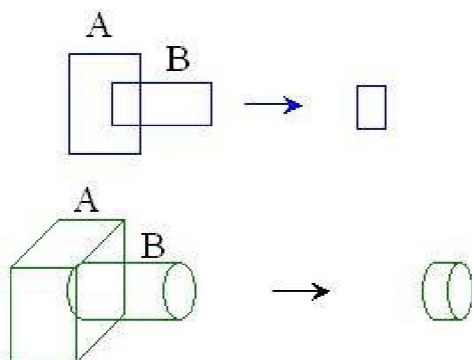


Рис. 2.40. Пересечение элементов

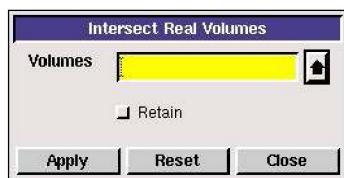


Рис. 2.41. Меню пересечения элементов

Меню пересечения элементов

вызывается нажатием кнопки . Его внешний вид показан на рис. 2.41. Элементы геометрии, пересечение которых необходимо найти, выбираются в единственном поле меню. Нажатие кнопки *Retain* в меню

позволяет сохранить копии исходных элементов.

2.4. Разделение элементов геометрии на части и объединение нескольких геометрических элементов в один

При построении расчетной области часто возникает необходимость разделить какой-либо элемент геометрии на части с помощью точки, линии, поверхности или объема. Также актуальной является команда объединения нескольких элементов в один.

Для выполнения таких операций используется команда *split/merge*. Доступ к ней осуществляется через вторую слева кнопку во втором ряду в меню операций с элементами геометрии (7 на рис. 2.5).

Разделение линии на части осуществляется с помощью команды

Split edge . Меню этой команды показано на рис. 2.42.

Линия может быть поделена на части тремя способами:

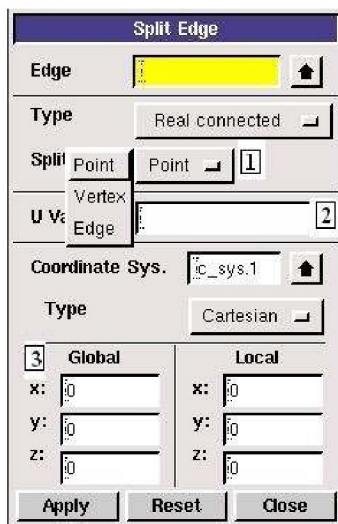
- точкой, положение которой указывается координатами или отношением, в котором она делит отрезок (*Point*);
- существующей точкой, лежащей на линии (*Vertex*);
- точкой пересечения двух линий (*Edge*).

Способ деления линии выбирается в списке *Split With* (1 на рис. 2.42)

Если отрезок делится несуществующей точкой (*Point*), то в поле *U value* (2 на рис. 2.42) задается отношение, в котором точка делит отрезок. Например, *U value* равное 0,5, означает, что исходный отрезок делится на две равные части. Координаты делящей точки (если они известны) вводятся в поле 3 рис. 2.42.

В случае выбора способа деления линии существующей точкой (*Vertex*) меню *Split edge* примет вид, показанный на рис 2.43. В этом меню в поле 1 выбирается делимый отрезок, а в поле 2 – делящая точка.

При делении линии точкой пересечения с другой линией меню примет вид, показанный на рис. 2.44.



Global		Local	
x:	0	x:	0
y:	0	y:	0
z:	0	z:	0

Рис. 2.42. Меню команды деления линии на части



Рис. 2.43. Меню команды деления линии на части

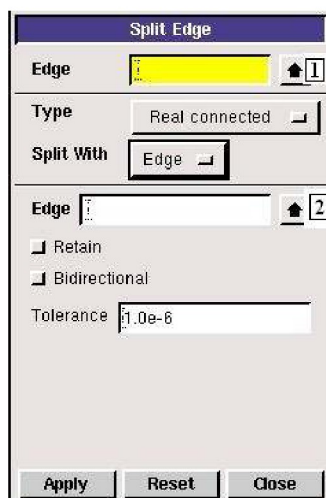


Рис. 2.44. Меню команды разделения линии на части точкой пересечения с другой линией

В этом меню в поле *Edge*, обозначенном цифрой 1, выбирается делимая линия, а в поле *Edge*, обозначенном цифрой 2 - делящая линия. При нажатии кнопки *Apply* первая линия будет поделена точкой пересечения на две части, а вторая удалена. Если в этом меню нажать кнопку *Retain*, то после выполнения операции копии исходных линий будут сохранены. Если активировать опцию *Bidirectional*, то точка пересечения будет делить на части обе линии, участвующие в операции.

Деление поверхности на части осуществляется с помощью команды

Split face . Меню команды показано на рис. 2.45.

Деление поверхности может происходить с помощью поверхности (*Face Real*), линии (*Edge*), двух точек (*Vertex*), лежащих на поверхности. Выбор способа деления осуществляется в списке *Split With* (1 на рис. 2.45). Разделяемая поверхность выбирается в поле 2, а делящий элемент в поле 3. В меню также имеются опции *Retain* и *Bidirectional*, выполняющие те же функции, что и в меню деления отрезка.

Деление объема на части осуществляется с помощью команды *Split Volume*

 . Деление может осуществляться с помощью объема или поверхности. Меню этой команды и работа с ней аналогичны меню команды деления поверхности, описанной выше. Результаты действия команды показаны на рис. 2.46.

Командой обратной *Split* является команда *Merge*  . Ее альтернативой

является сложение элементов  .

Команда *Merge* позволяет объединять несколько элементов в один виртуальный элемент. Для всех элементов эта команда схожа по действию. Типичный вид меню команды *Merge* показан на рис. 2.47.

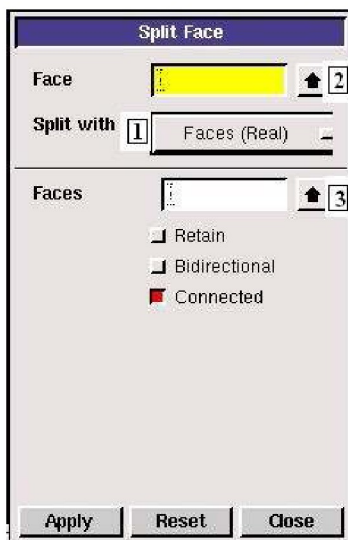


Рис. 2.45. Меню разделения поверхности на две части

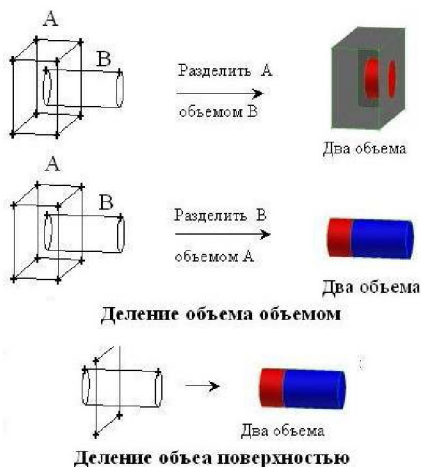


Рис. 2.46. Деление объемов на части различными способами

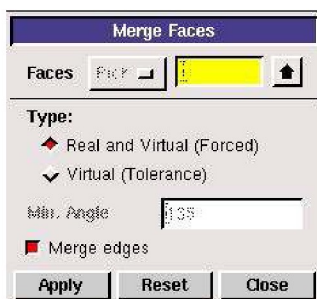


Рис. 2.47. Меню команды *Merge*

2.5. Объединение совпадающих объектов

В ряде случаев, например, после импортирования или копирования, расчетная модель может содержать совпадающие элементы – различные геометрические объекты, имеющие одинаковые размеры, координаты и т.д., а также элементы, координаты которых отличаются друг от друга незначительно. Совпадающие элементы создают заметные трудности при построении геометрии и конечноэлементной сетки.

Для того, чтобы удалить совпадающие элементы, используется команда *Connect* . Доступ к ней осуществляется нажатием второй справа в верхнем ряду кнопки в меню операций с геометрическими элементами (4 на рис. 2.5). В этом же месте находится кнопка доступа к меню команды *Disconnect* , действие которой обратно команде *Connect*.

Команды объединения/разъединения доступны только для точек, линий и поверхностей.

Меню команды *Connect* приведено на рис. 2.48. В этом меню в поле 1 с помощью мыши или из списка выбирается группа элементов, в которой предполагается наличие совпадающих объектов (для профилактики имеет

смысл выбрать все элементы). Команда запускается нажатием кнопки *Apply*. Найденные совпадающие элементы будут удалены. В случае, если модель ранее была разбита на конечные элементы, сетка будет сохранена. Эту команду рекомендуется обязательно выполнять после загрузки импортированной геометрии. Действие команды *Connect* показано на рис. 2.49.



Рис. 2.48. Меню команды *Connect*

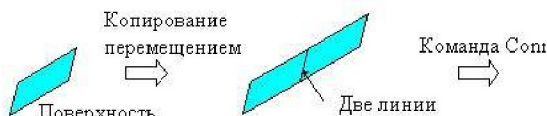


Рис. 2.49. Действие команды *Connect*

Командой обратной команде *Connect* является команда *Disconnect*



. Она предназначена для разъединения элементов геометрии. В результате ее выполнения создается дубликат выбранного объекта, и разъединяются объекты высшего уровня. Внешний вид меню *Disconnect* показан на рис 2.50. Действие команды представлено на рис. 2.51.



Рис. 2.51. Действие команды *Disconnect*

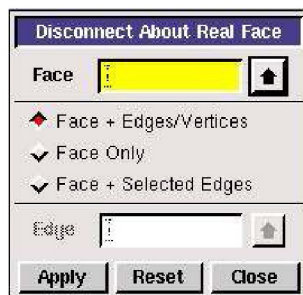


Рис.2.50. Меню команды *Disconnect*

2.6. Удаление элементов геометрии

Удаление элементов геометрии осуществляется с помощью команды

Delete . Доступ к ней осуществляется нажатием крайней правой кнопки в нижнем ряду в меню операций с элементами геометрии (10 на рис. 2.5). Вид меню команды *Delete* показан на рис. 2.52.

Работа с командой не вызывает сложностей. С помощью мыши выбираются объекты, которые необходимо удалить. Затем нажатием кнопки *Apply* подтверждается выполнение действия. Если в меню *Delete* активировать опцию *Lower Geometry*, то объект будет удален со всеми элементами низшего уровня (линиями, точками), принадлежащими ему. Если эта опция не активна, то будет удален только выбранный объект, все составляющие его элементы низшего уровня будут сохранены.

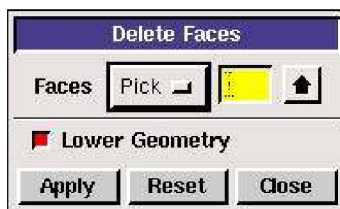


Рис. 2.52. Меню команды *Delete*

2.7. Группа меню редактирования атрибутов

Доступ к группе подменю

редактирования атрибутов элементов осуществляется нажатием правой кнопки в верхнем ряду в меню операций с элементами геометрии (5 на рис. 2.5). Здесь может быть осуществлен доступ к следующим командам.



- редактирование цвета элемента. С помощью данной команды можно изменить цвет элемента или сетки нанесенной на нем.



- изменение имени элемента.

Кроме указанных выше команд в нижнем ряду в меню операций с элементами геометрии, во второй справа позиции (9 на рис. 2.5) находятся кнопки доступа к командам получения информации об объекте:



- информация об объекте. Эта команда выдает полную информацию о выделенном элементе, например, координаты точек низшей топологии, площадь, объем, информацию о сетке и др.;



- проверка элемента на соответствие формату ACIS;



- ассоциация объекта с именем;



- вычисление суммарного числа элементов.

2.8. Операции с локальными системами координат

При построении и редактировании элементов геометрии расчетной области для упрощения выполнения некоторых операций удобно использовать вспомогательные локальные СК.

Построение, удаление и редактирование локальных СК осуществляется в группе меню:

Tools
(установки)



Coordinate System
(Система координат)



Внешний вид данного меню показан на рис. 2.53. В нем располагается группа кнопок доступа к командам построения, редактирования и изменения атрибутов локальных СК.

Вкратце рассмотрим эти команды.



- *создание локальной СК.*

Внешний вид меню данной команды показан на рис. 2.54. В нем в верхней части меню выбирается тип локальной СК (1 на рис. 2.54): декартова (*Cartesian*), цилиндрическая (*Cylindrical*) или сферическая (*Spherical*).

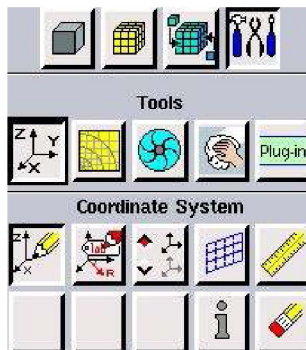


Рис. 2.53. Группа меню *Tools* → *Coordinate System*

Положение локальной системы относительно глобальной может быть задано двумя способами:

- заданием положения начала координат и углов поворота координатных осей локальной СК относительно глобальной (*Offset/Angle*);
- по трем точкам, одна из которых определяет положение начала координат, вторая - положение оси OX , третья - плоскость XOY (*Vertices*).

Выбор способа построения осуществляется в поле *Location and orientation* (2 на рис. 2.54). Этот выбор определяет параметры, которые необходимо ввести для описания СК. Вид меню в первом случае (*Offset/Angle*) показан на рис. 2.54. В нем в нижней части меню необходимо ввести углы, под которыми повернуты оси новой СК относительно существующей (в столбце *Angle*) и на сколько смещено начало координат (в столбце *Offset*).

Однако на практике удобнее задавать систему координат тремя точками (*Vertices*). Вид меню в случае выбора такого способа показан на рис. 2.55. В нем в поле *Origin* выбирается положение начала координат новой СК, в поле *X axis* - точка принадлежащая оси OX , в поле *XY plane* – точка принадлежащая плоскости XOY .

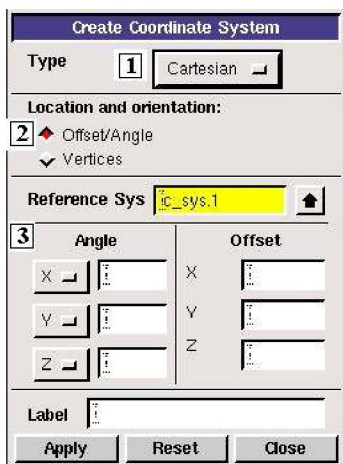


Рис. 2.54. Меню команды построения СК заданием положения начала координат и углов поворота координатных осей

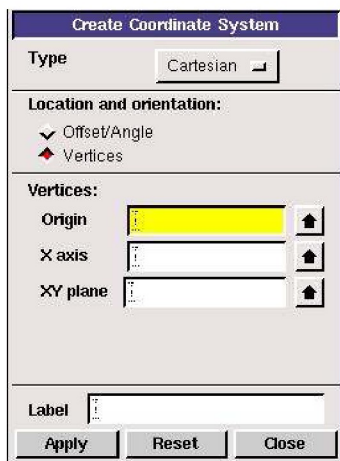


Рис. 2.55. Меню команды построения СК указанием базовых точек



- *изменение атрибутов локальной СК*. Данная команда позволяет изменить название и тип СК.



- *установка локальной СК текущей по умолчанию для всех команд*.



- *визуализация сетки в области построения*. Команда позволяет вывести на экран сетку с ячейками заданных размеров, которая может быть использована для построения объектов простой формы.



- *отображение вспомогательных линеек на осях координат* (рис. 2.56). Для того, чтобы их показать, необходимо выбрать пункт *on* в списке под названием соответствующей оси.

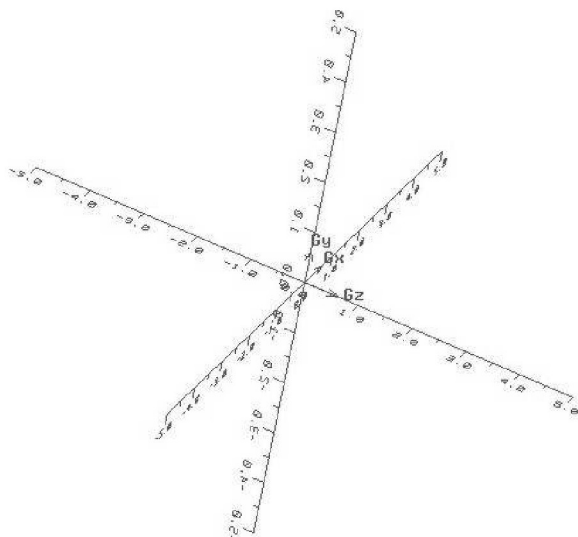


Рис. 2.56. Линейки на осях координат



- *удаление локальной СК*. Работа с данной командой не отличается от команды удаления любого другого элемента геометрии.

2.9. Примеры построения расчетных моделей

2.9.1. Пример построения трехмерной расчетной модели на основе примитивной геометрии

В данном примере будут продемонстрированы основные возможности препроцессора *Gambit* по работе с простейшими пространственными геометрическими объектами. В качестве иллюстрации предлагается построить модель, состоящую из пересекающихся параллелепипеда и эллиптического цилиндра. Внешний вид модели, которую необходимо создать показан на рис. 2.57.

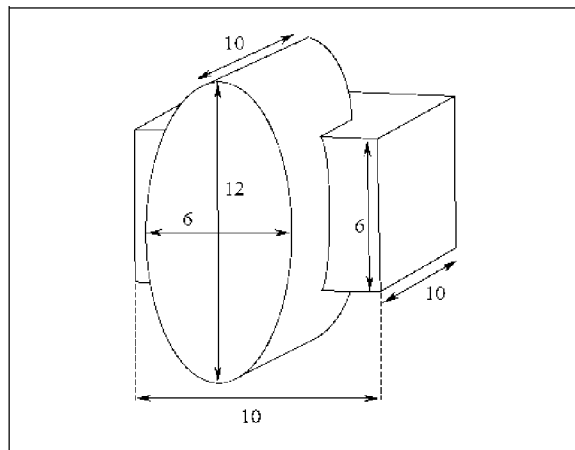


Рис. 2.57. Внешний вид расчетной модели из примера

Стратегия построения модели состоит в следующем: вначале создаются простейшие составляющие элементы (для рассматриваемого случая это параллелепипед и эллиптический цилиндр). Затем они с помощью операции сложения (см. раздел 2.3) соединяются в один объем.

Построение модели осуществляется в следующей последовательности.

Шаг 1. Запуск программы *Gambit*.

Запустите препроцессор *Gambit* нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню «Пуск» ОС «Windows»:

Пуск → *Все программы* → *Fluent Inc Products* → *Gambit 2.3.16* → *Gambit 2.3.16*

В появившемся окне (рис. 1.1) в поле *Working Directory* необходимо выбрать папку, в которой будут сохраняться модели в данной сессии. После этого следует нажать кнопку *Run*. Это приведет к появлению окна программы *Gambit*, которое показано на рис. 1.2.

Шаг 2. Задание имени модели.

Для определения имени вновь создаваемой расчетной модели в верхнем меню нужно выбрать следующие пункты:

BM: File → *New*.

Появится диалоговое окно, изображенное на рис. 1.7. В нем производятся следующие действия:

- в графе *ID* вводится имя модели латинскими буквами (например, *basgeom*);
- выбор имени подтверждается нажатием кнопки «*Accept*».

После этого действия появится окно уточняющее согласие пользователя на закрытие предыдущей сессии. В нем следует нажать кнопку «*Yes*». После этого в верхнем левом углу окна программы появится выбранное имя модели.

Шаг 3. Выбор программы, в которой будет происходить решение рассматриваемой задачи.

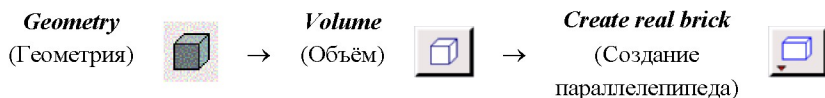
От этого выбора зависит набор доступных граничных условий и типов конечных элементов. В данном примере полагаем, что дальнейший расчет модели будет проходить в программе *Fluent 6*. Поэтому в верхнем меню следует выбрать:

BM: Solver → Fluent 5/6.

Примечание. В препроцессоре версии *Gambit 2.3.16* эта настройка установлена по умолчанию и данный пункт можно не выполнять.

Шаг 4. Построение параллелепипеда.

Для построения параллелепипеда в панели *Operation*, находящемся в правом верхнем углу окна программы *Gambit*, следует выбрать:



В результате появится меню, изображенное в середине правой части на рис. 2.58. В нем следует поставить курсор в поле *Width* (ширина) и ввести числовое значение ширины параллелепипеда. В разбираемом примере она равна *10*. Аналогичным образом вводится значение длины (в поле *Depth*) равное *6*. Перейти из поля *Width* в поле *Depth* можно без использования мыши. Для этого следует нажать клавишу *Tab* на клавиатуре. Точно также в поле *Height* можно ввести значение высоты параллелепипеда. Однако, если его оставить пустым, то значение высоты будет принято равным значению ширины (*Width*).

В списке *Direction* следует выбрать пункт *Centered*. Этим образом будет описано, что параллелепипед будет располагаться так, что его центр совпадет с началом координат.

Выполнение команды запускается нажатием кнопки *Apply*.

Обратите внимание, что в окне сообщений появится запись: *created volume: volume. 1*, означающее, что объем с описанными выше размерами был создан (рис. 2.58).

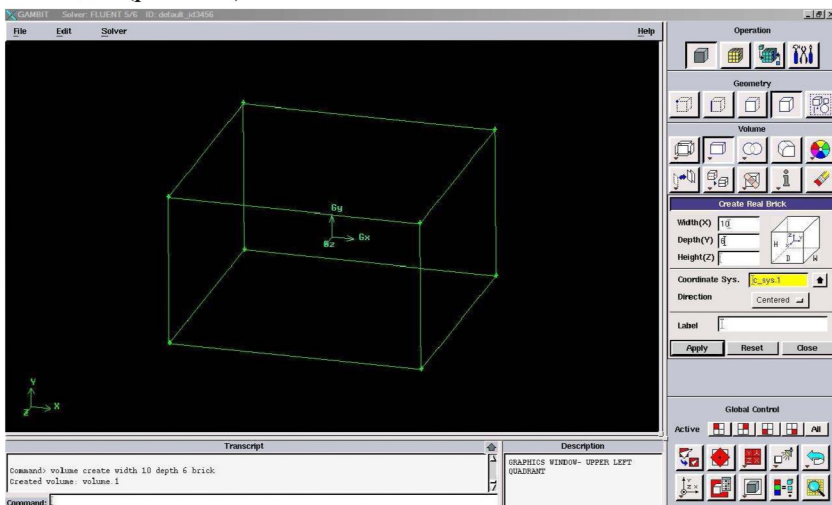
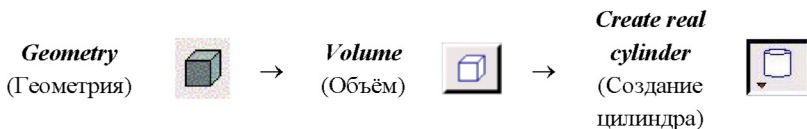


Рис. 2.58. Построение параллелепипеда

Если построение показало, что при описании фигуры были сделаны ошибки, действие можно отменить с помощью кнопки  («отмена»), расположенной в нижнем правом углу окна программы.

Шаг 5. Построение эллиптического цилиндра.

Для построения цилиндра в панели *Operation*, находящемся в правом верхнем углу окна программы *Gambit*, следует выбрать:



Для того, чтобы получить доступ к кнопке , необходимо щелкнуть правой клавишей мыши на кнопке  и в появившемся списке выбрать требуемую команду. В результате появится меню, изображенное в правой части окна программы (рис. 2.59).

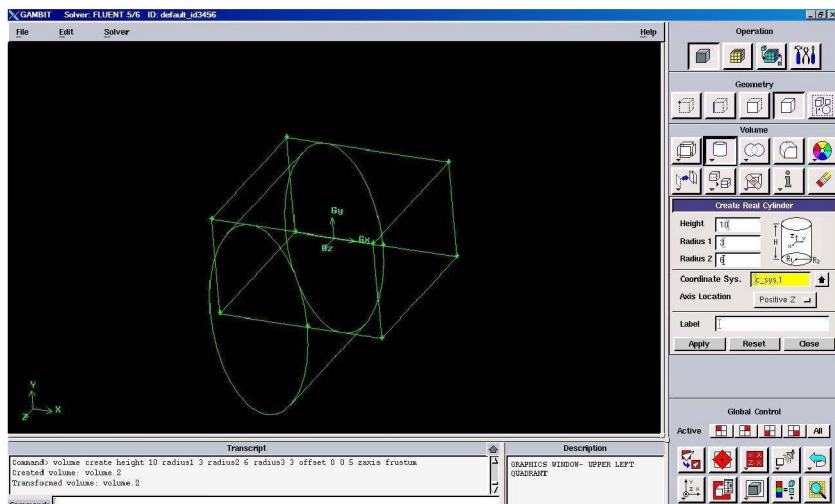


Рис. 2.59. Параллелепипед и эллиптический цилиндр

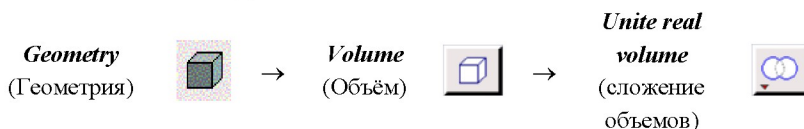
В нем необходимо провести следующие действия:

1. В поле *Height* следует ввести значение высоты цилиндра, равное 10.
2. В поле *Radius 1* вводится значение меньшего радиуса эллипса (в рассматриваемом примере 3).
3. В поле *Radius 2* вводится значение большего радиуса эллипса (в рассматриваемом примере 6).
4. Для рассматриваемого случая ось цилиндра совпадает с осью *oz*, начало координат лежит на одной из граней цилиндра, а сам он находится в области положительных значений координаты *z*. Для того, чтобы это описать в списке *Direction* необходимо выбрать пункт *Positive Z*.
5. Выполнение команды запускается нажатием кнопки *Apply*.

Полученный результат показан на рис. 2.59.

Шаг 6. Объединение объёмов.

Для объединения построенных ранее объектов в один объём следует воспользоваться командой:



В результате появится меню, изображенное на рис. 2.36. В нем, в поле *Volumes*, следует выбрать объединяемые объемы. Выбор осуществляется щелчком левой клавишей мыши с нажатой клавишей *Shift* на любой грани выбираемого объекта.

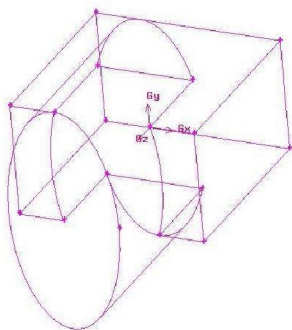


Рис. 2.60. Параллелепипед и цилиндр, объединённые в один объем

Обратите внимание, что выбранный объект подкрашивается красным цветом, а его имя появляется в поле *Volumes* рассматриваемого меню.

Выполнение команды запускается нажатием кнопки *Apply*. Полученный результат показан на рис. 2.60.

Шаг 7. Управление

изображением.

Рассмотрите построенную модель, используя встроенные средства препроцессора *Gambit*. Для этого следует выполнить следующие манипуляции.

1. Увеличивайте и уменьшайте изображение в рабочем окне, удерживая нажатой правую клавишу мыши и двигая мышь от себя и к себе.
2. Вращайте модель вокруг центра экрана, удерживая нажатой правую клавишу мыши и двигая мышь вправо и влево.
3. Вращайте изображение, удерживая нажатой левую клавишу мыши и двигая мышь в любом направлении.
4. Перемещайте модель, удерживая нажатой среднюю клавишу мыши и двигая ее.
5. Нажмите кнопку **Select present configuration** , находящуюся на панели в правом нижнем углу. При этом окно изображения будет разделено на четыре четверти, в каждой из

которых будут показаны проекции модели и аксонометрический вид (рис. 2.61). Каждым видом можно управлять независимо.

6. Верните изображение модели в одном окне. Для этого нажав левой кнопкой мыши в точке пересечения линий, разделяющих виды (рис. 2.61), перетащите ее в один из углов окна построения модели.



7. Нажмите на кнопку , находящуюся на панели в нижней части правой части окна программы. Модель будет изображена таким образом, что будет соответствовать расположению координатных осей на иконке (т.е. ось *oz* направлена перпендикулярна экрану). Щелкните на той же кнопке правой клавишей мыши и сориентируйте модель по другим координатным осям.

8. Выберите масштаб модели таким образом, чтобы она занимала всю область построения. Для этого нажмите кнопку *Fit to*



window , находящуюся в правой нижней части окна программы.

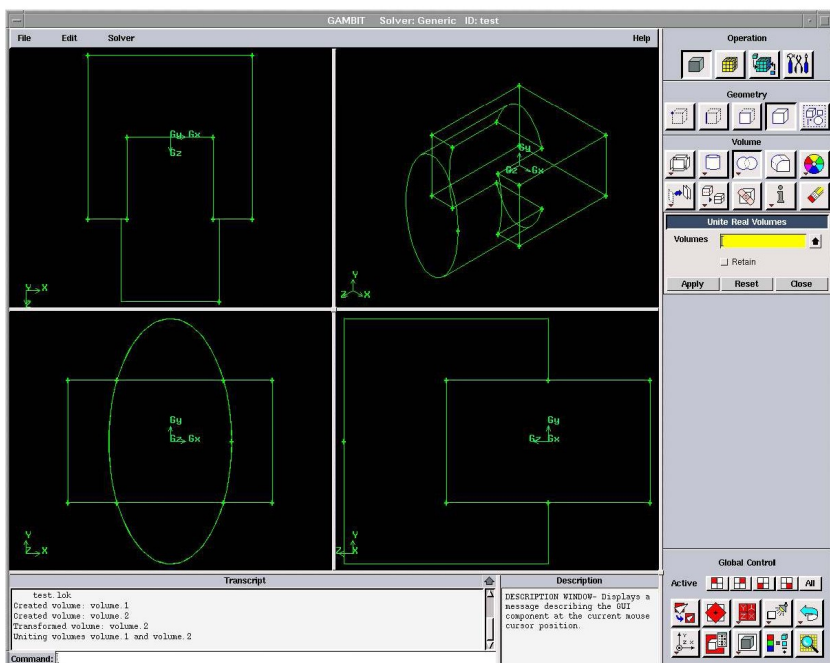


Рис. 2.61. Действие команды *Select present configuration*

Шаг. 8. Сохранение модели в программе *Gambit*.

Сохранение модели в *Gambit* для редактирования или каких-то других действий производится с помощью команды:

BM: *File* → *Save*.

Шаг. 9. Заккрытие программы *Gambit*.

Заккрытие программы *Gambit* осуществляется командой:

BM: *File* → *Exit*.

Перед закрытием программы появится окно, предлагающее сохранить модель. Для того, чтобы это сделать, нужно нажать кнопку *Yes*. В противном случае нужно нажать кнопку *No*.

Заккрытие окна программы стандартным образом в ОС «*Windows*» с помощью крестика в правом верхнем углу не всегда проходит корректно и этим способом пользоваться не стоит.

Аналогичным образом можно построить расчетные модели достаточно сложной формы, не прибегая к предварительному построению точек, линий или поверхностей.

2.9.2. Пример построения расчетной модели межлопаточного канала осевой турбины

В данном примере будет построена двухмерная расчетная модель течения газа в межлопаточном канале осевой турбины. Внешний вид канала показан на рис. 2.62, а в табл. 2.1 приведены координаты профиля и центров кромок, а также значения радиусов окружностей входной и выходной кромок.

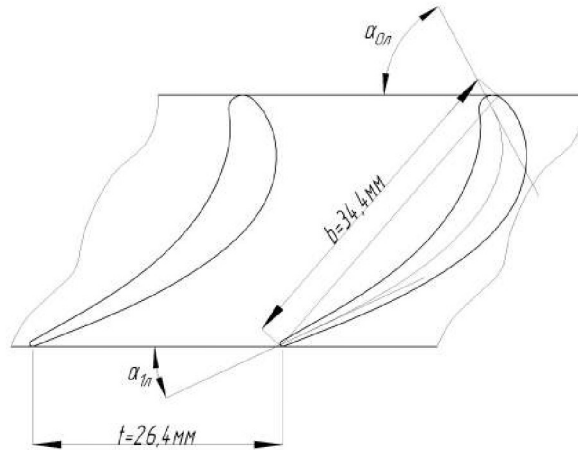


Рис. 2.62. Общий вид решетки профилей

На расчетном режиме угол входа потока в решетку $\alpha_{0p}=59,1^\circ$, а угол выхода потока $\alpha_{1p}=27,1^\circ$.

Расчетная модель для исследования течения газа в канале включает в себя непосредственно межлопаточный канал, а также входные и выходные области. Общий вид расчетной модели для исследования течения в элементарном ЛВ турбины в программе *Fluent* показан на рис. 2.2.

Таблица 2.1

Координаты профиля исследуемой решетки

Спинка		Корытце	
X_c , мм	Y_c , мм	X_{ko} , мм	Y_{ko} , мм

0,11	-0,28	-0,14	0,26
4,10	1,28	2,95	1,97
7,90	2,84	5,89	3,65
11,48	4,48	8,64	5,37
14,80	6,23	11,17	7,16
17,83	8,13	13,45	9,04
20,55	10,19	15,44	11,01
22,85	12,45	17,15	13,06
24,57	14,97	18,54	15,16
25,54	17,67	19,61	17,28
25,74	20,36	20,38	19,37
25,20	22,83	20,81	21,41
24,06	24,88	20,87	23,34
23,20	25,81	20,72	24,38
Координата X центра входной окружности, мм			22,18
Координата Y центра входной окружности, мм			24,70
Радиус входной окружности r_1 , мм			1,5
Координата X центра выходной окружности, мм			0
Координата Y центра выходной окружности, мм			0
Радиус выходной окружности r_2 , мм			0,3
Шаг решетки, мм			26,37

Необходимость входного и выходного участка расчетной модели обусловлена тем, что эпюры распределения параметров на входе (выходе) в канал, как правило, неизвестны. Задание равномерных или существенно отличающихся от действительности полей параметров на входе значительно снижает точность расчета и изменяет картину течения. Пристройка выходной области дает возможность учесть влияние возмущений за решеткой на течение в ней. Для решения задач, связанных с течением в решетках турбомашин, входные и выходные границы рекомендуется располагать от соответствующей кромки на расстоянии, равном шагу t [26]. Боковые образующие входной и выходной областей наклонены под углами α_{0p} и α_{1p} к фронту решетки соответственно.

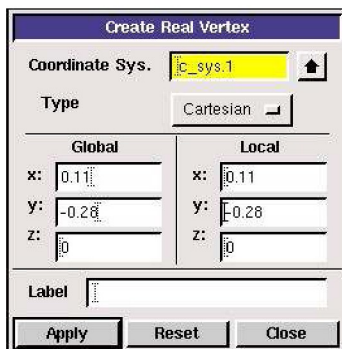


Рис. 2.63. Меню построения точек по координатам

Поскольку течение в решетке турбомашин является периодическим, то нет необходимости моделировать его целиком. Для упрощения расчета и сокращения его времени обычно рассматривают только один межлопаточный канал, налагая на соответствующие границы периодическое граничное условие.

Для исследования течения в ЛВ турбины следует использовать следующие граничные условия (рис. 2.2):

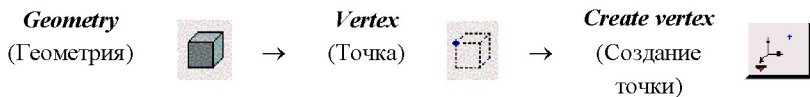
- на входной границе - полное давление и температура потока, направляющие косинусы вектора скорости и граничные условия турбулентности;
- на выходной границе – статическое давление;
- на боковых поверхностях - периодическое граничное условие;
- на стенках лопатки - условие неприлипания рабочей среды.

Шаг 1. Подготовительный.

Запустите программу *Gambit*, создайте новую модель с именем *turbine* и укажите, что модель будет рассчитываться в программе *Fluent 6*, подобно тому, как это делалось в примере 1.1 (раздел 2.9.1).

Шаг 2. Построение базовых точек.

Меню построения точек по координатам (рис. 2.63) вызывается в главном меню с помощью команды:



В появившемся меню в поле *Global* (в глобальной системе координат) следует ввести координату требуемой точки, например $(0,11; -0,28; 0^1)$.

¹ Поскольку рассматриваемая задача двухмерная, то координата z всех точек будет равна 0.

Подтверждается построение точки нажатием кнопки «Apply». Аналогичным образом следует ввести все точки из таблицы координат профиля лопатки (табл. 2.1), включая центры входной и выходной окружностей.

В случае совершения ошибки действие можно отменить с помощью кнопки  («отмена»), находящейся в нижней правой части окна программы. Увидеть все построенные точки можно с помощью кнопки  («вписать в экран»).

Результат построения изображен на рис. 2.64.

Шаг 3. Построение контура профиля лопатки.

Профиль турбинной лопатки образован двумя дугами окружностей (входная и выходная кромки) и двумя сплайнами (спинка и корытце).

Начинать построения удобно со сплайнов. Для этого нужно вызвать соответствующее меню командой:



Примечание. По умолчанию кнопка  скрыта, получить доступ к ней, а также к другим кнопкам меню построения линий можно, щелкнув правой клавишей мыши на левой кнопке в верхнем ряду в подменю *Edge*.

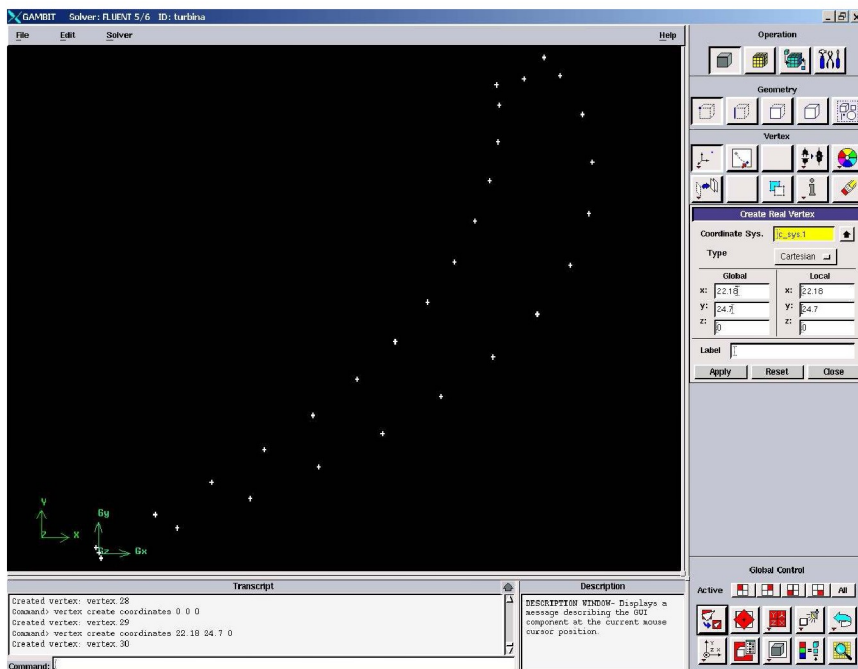


Рис. 2.64. Построенные базовые точки профиля

Для построения контура корытца необходимо с помощью мыши и нажатой клавиши *Shift* выбрать соответствующие точки в порядке следования. Для принятия действия нужно нажать кнопку «Apply». Результат действия показан на рис. 2.65.

Спинка профиля строится аналогичным образом (рис.2.66).

На следующем этапе строятся дуги, образующие кромки профиля. Для этого нужно вызвать меню построения дуг (рис. 2.67):

Geometry
(Геометрия)



Edge
(Линия)



Create arc
(Создание дуги)



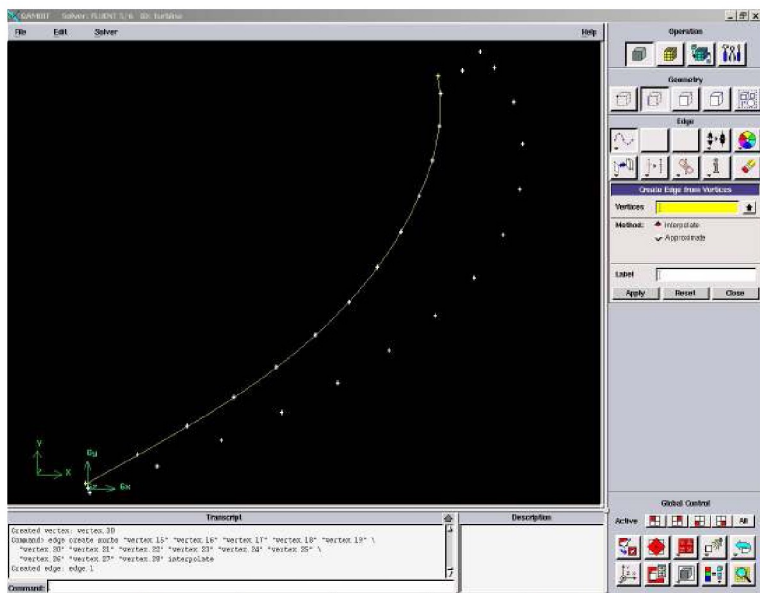


Рис. 2.65. Меню построения сплайна и результат построения корытца

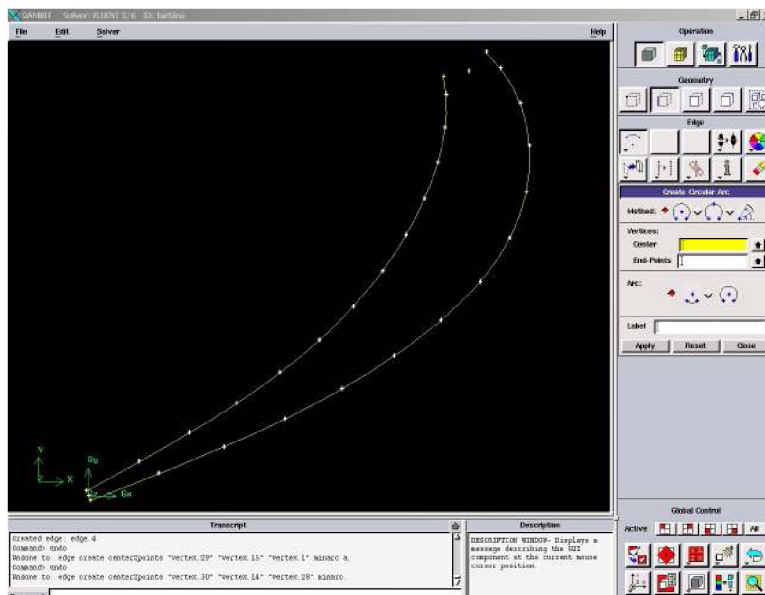


Рис. 2.66. Результат построения спинки

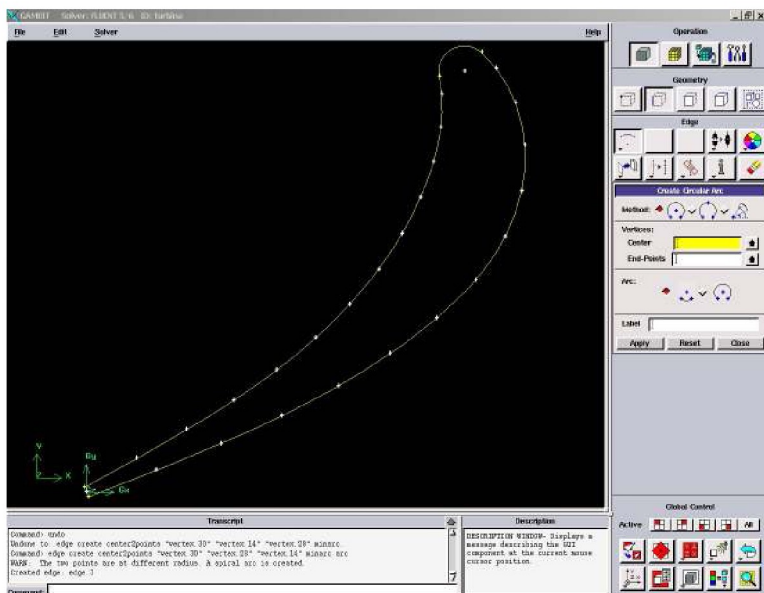


Рис. 2.67. Меню построения дуги и результат построения входной окружности

Примечание. Кнопка  скрыта. Получить доступ к ней, а также как и к меню построения сплайнов можно, щелкнув правой клавишей мыши на левой кнопке в верхнем ряду в подменю *Edge*.

В этом меню нужно выполнить следующие действия:

- в графе *Method* нужно выбрать метод построения дуги (по центру и двум точкам);
- в поле *Center* выбрать центр окружности входной кромки;
- в поле *End-points* выбрать верхние концы построенных сплайнов;
- поле *Arc* оставить без изменений;
- запустить команду с помощью кнопки «Apply».

Результат выполнения команды показан на рис. 2.67.

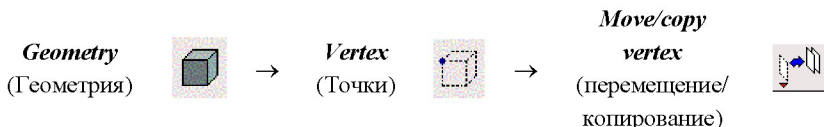
Аналогичным путем строится дуга выходной кромки.

Шаг 4. Построение боковых границ входной и выходной области.

Для построения боковых поверхностей входной и выходной областей (рис. 2.2) нужно из центров окружностей кромок построить горизонтальные отрезки, равные шагу решетки t , затем повернуть их

относительно центров окружностей на требуемый угол и разделить на части точкой пересечения.

Для того, чтобы построить горизонтальную линию, необходимо построить вспомогательные точки на расстоянии t от центров входной и выходной окружностей, затем соединить их. Для этого следует воспользоваться меню перемещения/копирования точек (рис. 2.68):



Для проведения копирования следует нажать кнопку *Copy* в верхней части меню (в противном случае выбранные элементы будут сдвинуты, если не являются частью других объектов).

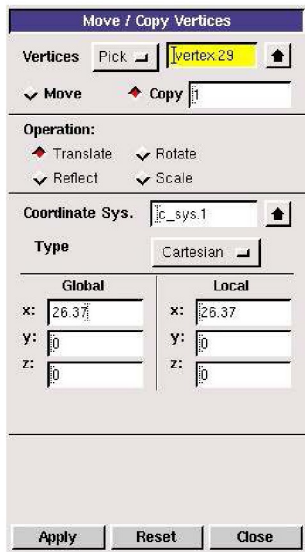


Рис. 2.68. Меню копирования/перемещения точек

С помощью мыши нужно выбрать копируемые точки (центры входной и выходной кромок). Поскольку точки получаются линейным переносом, то в поле *Operation* нужно нажать кнопку *Translate*, а в поле *Global* следует ввести величину смещения по осям. В рассматриваемом примере смещение осуществляется вдоль оси OX на расстояние, равное шагу $t=26,37\text{мм}$.

Чтобы увидеть все построенные точки, используйте кнопку

Для получения искомых отрезков нужно полученные точки соединить с центрами входных окружностей линиями

с помощью команды (рис. 2.69):



Соединяемые точки выбираются с помощью мыши, и выбор подтверждается нажатием кнопки «Apply». Результат выполнения действия

показан на рис. 2.69. Для построения боковой границы входной области (рис. 2.62) верхний отрезок необходимо повернуть относительно центра входной окружности на угол 180°

$-\alpha_{op} = 180^\circ - 59^\circ = 121^\circ$. В программе *Gambit* нельзя повернуть отрезок относительно точки. Поворот обязательно должен проходить относительно оси. Поэтому следует построить точки на предполагаемых осях вращения. Они получаются копированием центров входной и выходной окружностей вдоль оси z на произвольное расстояние. Результат выполнения действия показан на рис. 2.70.

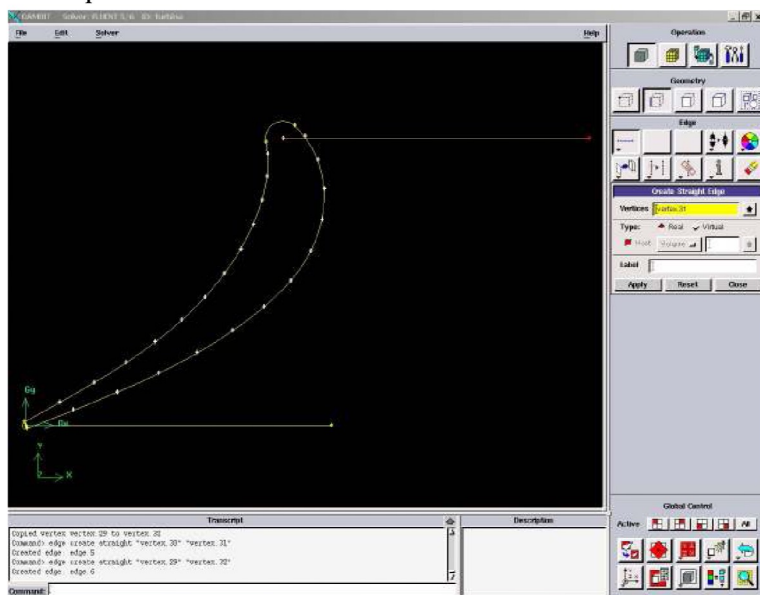


Рис. 2.69. Меню построения отрезков по точкам и результат построения

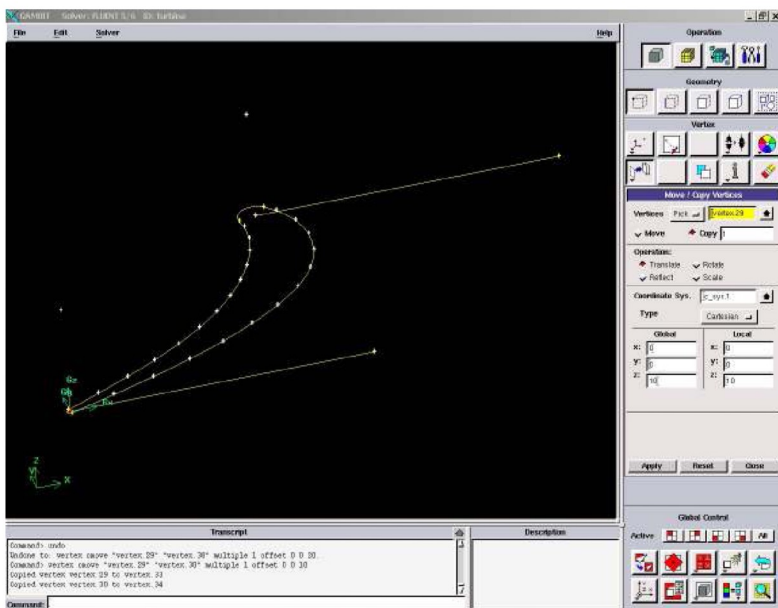
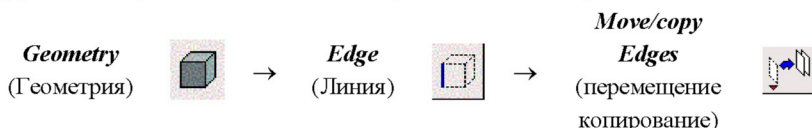


Рис. 2.70. Результат построения вспомогательных точек

Для поворота верхней прямой относительно центра входной окружности нужно вызвать меню перемещения/копирования линий:



Меню показано на рис. 2.71,а. Как можно видеть, оно подобно меню копирования точек (рис. 2.68). В нем нужно провести следующие действия.

С помощью мыши нужно выбрать поворачиваемую линию (например, верхнюю). В верхней части меню нужно выбрать пункт *Move*, указывающий на то, что выбранный объект будет перемещен.

В поле *Operation* следует выбрать опцию *Rotate*, указывающую на то, что перемещение будет осуществлено вращением.

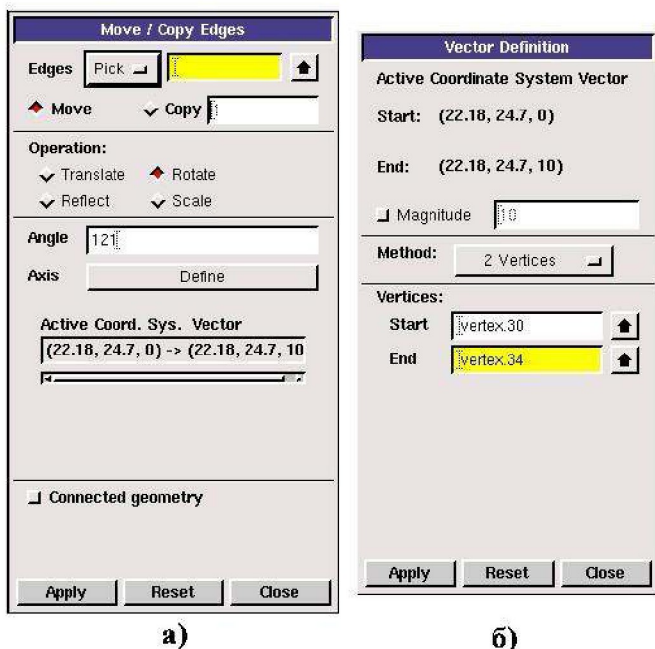


Рис. 2.71. Меню перемещения/копирования линии:

а – меню перемещения с настройками для поворота линии; б – меню указания оси поворота

В поле *Angle* необходимо ввести угол поворота (в рассматриваемом примере 121°).

Для указания оси, относительно которой будет осуществляться поворот, необходимо нажать кнопку *Define* в поле *Axis*. В появившемся окне (рис.2.71, б) в поле *Method* нужно выбрать пункт (2 Vertices – по 2-м существующим точкам). Затем в поле *Start* указать начальную точку оси вращения – центр входной окружности, затем в поле *End* указать вторую точку оси вращения – точку, расположенную выше. Для выполнения операции нужно нажать кнопку «*Apply*» в обоих окнах. Выбранный отрезок повернется на заданный угол. Если отрезок повернулся в сторону, противоположную требуемой, нужно поменять знак у значения угла или порядок назначения точек оси.

Аналогичным образом нижний отрезок поворачивается на угол 180° по часовой стрелке относительно центра выходной окружности. Результат построения боковой границы показан на рис. 2.72.

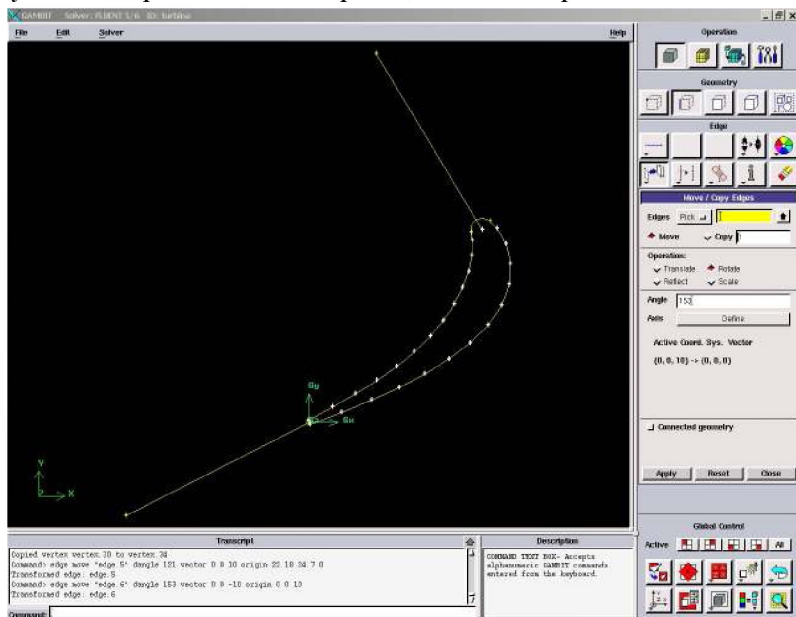
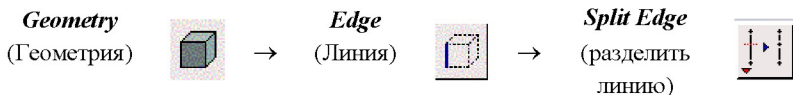


Рис. 2.72. Результат поворота боковых граней

На следующем этапе входную/выходную кромку и отрезки, пересекающие их, нужно разделить в точке пересечения и удалить лишнее.

Для того, чтобы разделить отрезок точкой пересечения на две части, вызывается команда:



В результате появится меню, показанное на рис. 2.73.

В верхнем поле **Edge** нужно выбрать дугу входной кромки. В поле **Split With** (разделить с помощью.....) нужно выбрать **Edge** (разделить в месте пересечения линий).

В нижней графе *Edge* нужно выбрать отрезок, пересекающий входную кромку. Кнопка *Bidirectional* должна быть нажата. Это определяет то, что обе линии будут разбиты точкой пересечения. Запуск действия осуществляется кнопкой «*Apply*». В результате две пересекающиеся линии будут разделены точкой пересечения. Отрезок, оказавшийся внутри профиля, необходимо удалить с помощью команды:

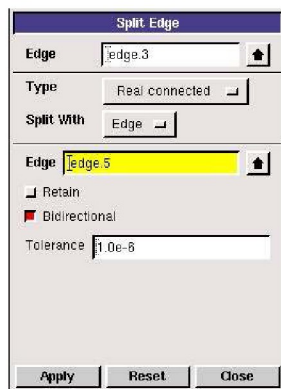


Рис. 2.73. Меню разделения линии

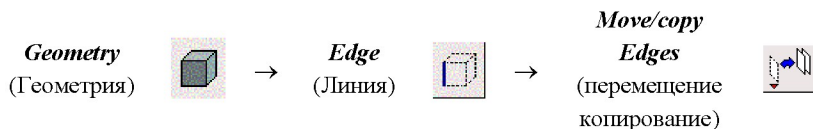


Удаляемая линия выбирается с помощью мыши. Выбор подтверждается нажатием кнопки «*Apply*».

Аналогичные действия проводятся с нижней выходной кромкой и нижним отрезком.

Шаг 5. Копирование построенных элементов и доработка расчетной области.

В результате проведенных манипуляций была получена боковая граница расчетной области (см. рис. 2.2). Чтобы получить вторую боковую границу, нужно скопировать уже построенные элементы вдоль фронта решетки (оси x) на величину шага t . Копирование проводится с помощью уже известной команды:



Результат действия показан на рис. 2.74.

Для завершения построения контура расчетной области следует соединить верхние и нижние точки боковых границ. Результат построения показан на рис. 2.75.

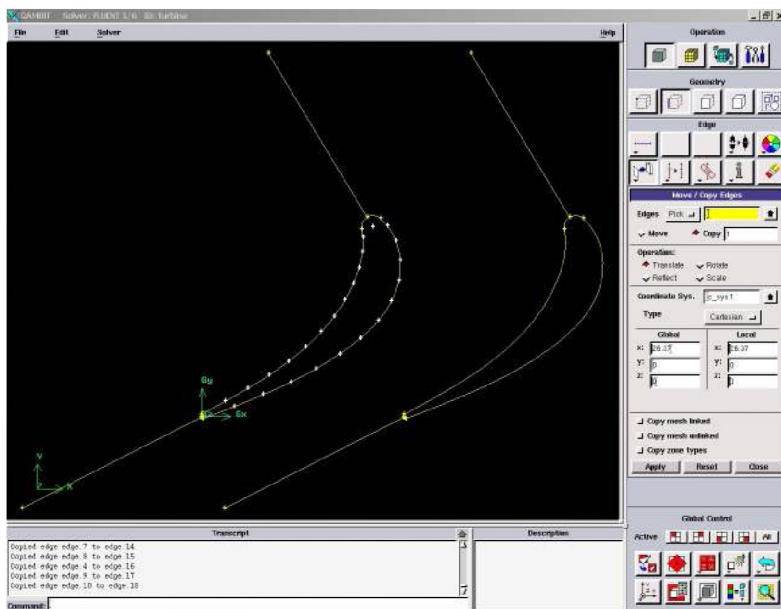


Рис. 2.74. Результат копирования

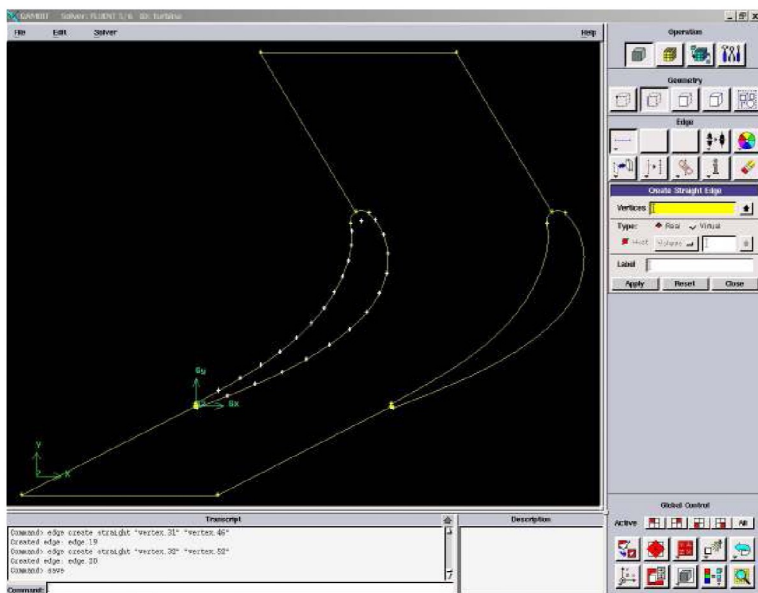
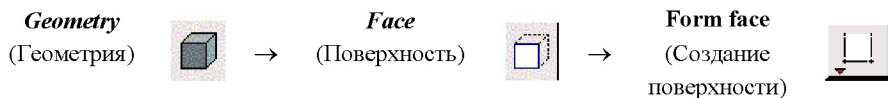


Рис. 2.75. Результат построения контура расчетной области

Шаг. 6. Построение поверхности.

Основой для построения конечно-элементной сетки двухмерной модели является поверхность. Она строится с помощью меню построения поверхности (рис. 2.76):



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно *Edges* и с помощью мыши выбирать линии, образующие замкнутый контур расчетной области. Для построения поверхности следует нажать кнопку «Apply». В результате линии контура модели поменяют цвет.



Рис. 2.76. Меню построения поверхности по линиям

Шаг 9. Просмотр построенной модель в виде «твердого тела».

В ряде случаев, для того, чтобы убедиться, что операция построения поверхностей или объемов прошла удачно, необходимо скрыть невидимые линии. Для этого нужно нажать

кнопку  в меню управления видами (рис. 2.77). Для того, чтобы вновь увидеть модель в виде каркаса, следует щелкнуть на той же кнопке правой клавишей мыши и из трех появившихся кнопок выбрать .

На этом построение геометрии модели для исследования течения газа в межлопаточных каналах элементарного ЛВ закончено. Полученную модель следует сохранить.

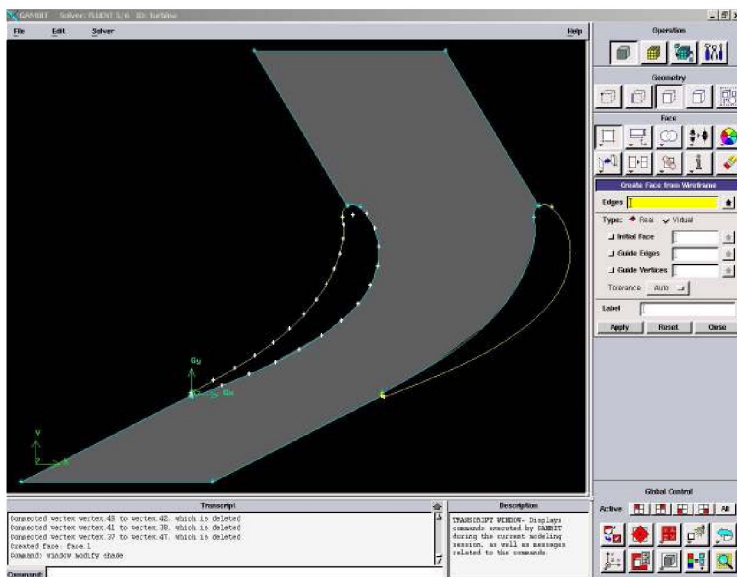


Рис. 2.77. Результат построения поверхности

2.9.3. Пример построения двухмерной модели центробежного вентилятора

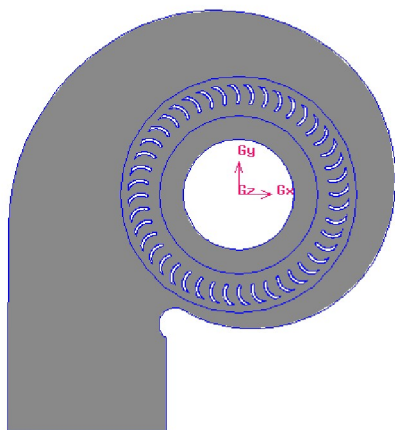
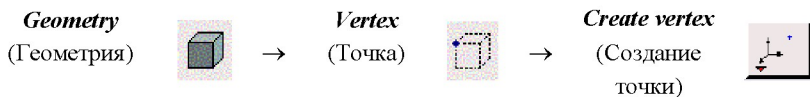


Рис. 2.78. Конечный вид центробежного вентилятора

В данном примере рассматривается построение двухмерной модели центробежного вентилятора (рис. 2.76). При выполнении данного примера подразумевается, что выполняющий его, проделал два предыдущих и имеет представление об основных командах построения и редактирования геометрии в программе *Gambit*. Поэтому на встречав-

шихся ранее командах внимание заостряться не будет.

Шаг. 1. Создается двухмерная модель лопатки вентилятора. С помощью меню построения точек строится точка с координатами (0, 0, 0).



Шаг. 2. С помощью команды *Create Real Circular Arc* строится спинка и корытце:



В появившемся меню (рис. 2.9) выбирается способ построения дуги по точке и заданием начального и конечного угла (3 на рис. 2.9). При этом меню примет вид, изображенный на рис. 2.79.

В этом меню в поле *Radius* вводится значение радиуса, равное 7,81, в поле *Start Angle* вводится начальное значение угла, равное $247,3^\circ$, а в поле *End Angle* – конечное значение угла $-350,34^\circ$. В поле *Center* следует выбрать точку, построенную в шаге 1. В поле *Plane* следует выбрать пункт XY. Эта настройка говорит о том, что дуга будет лежать в плоскости XOY.

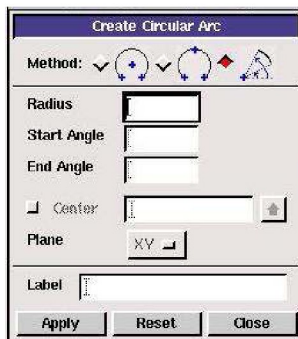


Рис. 2.79. Меню построения дуги с помощью точки и двух углов

Для построения дуги со сделанными настройками следует нажать кнопку «Apply».

Шаг. 3. Аналогично создается вторая дуга, лежащая в той же плоскости, с радиусом 9,6, с начальным углом $247,3^\circ$ и конечным углом 328° .

Шаг 4. С помощью команды построения отрезков (команда  →  → ) строятся две линии соединяющие концы дуг. Таким образом, был

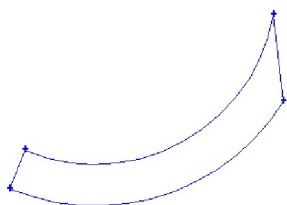


Рис. 2.80. Построенный контур лопатки

получен контур лопатки вентилятора. Результат построения показан на рис. 2.80.

Шаг 5. Создается поверхность на четырех построенных ранее ребрах (команда  →  → ).

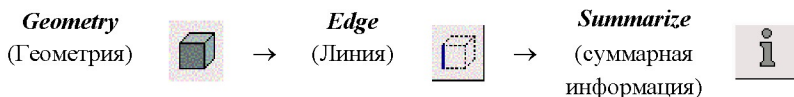
Шаг 6. В этом и нескольких следующих шагах будет создаваться закругленная входная кромка лопатки. Для

этого с помощью команды *Split Edge* прямой отрезок слева делится пополам:



В результате появится меню, показанное на рис. 2.42. В нем в поле *Edge* выбирается нужный отрезок, а в поле *U value* следует ввести пропорцию, в которой делится отрезок (в рассматриваемом примере 0,5) и нажать кнопку «Apply». Теперь левая грань поверхности лопатки состоит из двух отрезков.

Шаг 7. С помощью команды:



в окно сообщений выводится информация о полученных отрезках. Как можно заметить их длины (*interval size: 0.985*) равны.

Шаг. 8. Создается круг с центром в точке делящей левую грань лопатки пополам. Для этого сначала в указанной точке создается вспомогательная система координат с помощью команды:



В появившемся меню необходимо выбрать пункт *Vertex* (в этом случае СК будет описана тремя точками). Меню команды примет вид, изображенный на рис. 2.55. В нем в поле *Origin* следует выбрать точку, которая будет центром локальной СК (в центре левой грани), в поле *X axis* – точку, лежащую на левой грани выше центральной точки, а в поле *XY*

plane – точку, принадлежащую плоскости XOY (любую точку принадлежащую правому отрезку лопатки).

После запуска команды, изображение в рабочем окне будет так, как показано на рис. 2.81. На нем ясно видна построенная СК. Ее ориентация зависит от выбранных точек.

Шаг. 9. С помощью команды:

Geometry
(Геометрия)



Face
(Поверхность)



**Create real
circular face**
(Создание
круга)



создается круг в центре построенной ранее локальной СК. Для этого в поле *Radius* вводится величина радиуса 0,895. Следует также обратить внимание, чтобы в поле *Coordinate sys* была выбрана локальная СК.

Шаг 10. Поверхность лопатки и

круг в объединяются в единую

поверхность (команда  → 

→ ). Результат действия показан на рис. 2.82.

Шаг 11. Локальная СК больше не нужна и она удаляется с помощью команды:

Tools

(установки)



**Delete Coordinate
System**

(удаление СК)



Шаг 12. Полученная лопатка перемещается вдоль оси OX на 61,597,

вдоль OY на 8,694 (команда  →  → ).

Шаг 13. С помощью команды:

Geometry



Face



**Move/copy
Edges**

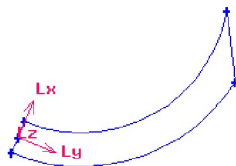


Рис. 2.81. Контур лопатки с локальной и глобальной СК

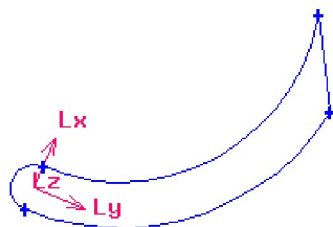


Рис. 2.82. Контур лопатки с входной кромкой

(Геометрия)

(Поверхность)

(перемещение
копирование)

создается 43 копии созданных лопаток вокруг начала координат глобальной СК. Лопатки отстоят друг на друга на 8.1818182. Для этого в появившемся меню (рис. 2.32) следует активизировать опции *Copy* (копирование) и *Rotate* (вращение вокруг оси). В поле рядом с опцией *Copy* указывается число копий (43). Величина угла поворота вводится в поле *Angle*. В качестве оси вращения следует выбрать положительное направление оси *OZ* (см. раздел 1.5).

Шаг. 14. Создается три круга радиусом 35,50,80 (команда  →  →  → ). Самый маленький круг будет входом в вентилятор, два других будут представлять вход и выход рабочего колеса.

Шаг 15. Наружный контур модели вентилятора создается по точкам. Это можно сделать двумя путями. Ввести координаты каждой точки или загрузить их из текстового файла. Для того, чтобы воспользоваться вторым способом для рассматриваемого примера нужно внутренними средствами ОС «Windows» создать текстовый файл с расширением *.dat* с координатами точек. Содержание файла и синтаксис следующие:

```
-45.932 -90.861 0  
-49.209 -77.373 0  
-36.565 -72.305 0  
30.387 -82.540 0  
89.672 -33.925 0  
96.408 35.141 0  
58.617 92.587 0  
2.271 115.681 0  
-60.605 107.608 0  
-124.262 52.880 0  
-145.553 -21.338 0  
-145.972 -116.028 0  
-145.972 -150.000 0  
-45.932 -150.000 0
```

Созданный файл читается в *Gambit* с помощью команды:

BM: File → Import → Vertex Data File.

В результате будут загружены 14 точек.

Шаг 16. Сверяясь с рисунком 2.83 и используя команду построения отрезков, дуг и сплайнов, следует создать наружный контур модели вентилятора.

Шаг 17. На основе построенных линий создается поверхность, ограниченная наружным контуром модели вентилятора (команда    ).

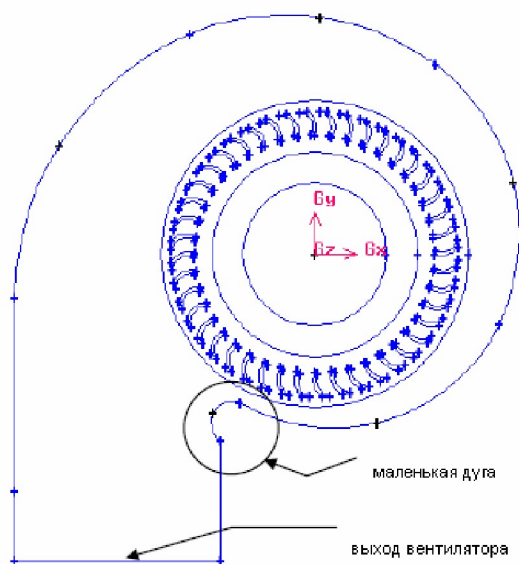


Рис. 2.83. Наружный контур вентилятора

Шаг 18. Используя команду *Split Faces* (команда    ), поверхность, образующая корпус вентилятора делится большим кругом радиусом 80. Для этого в появившемся меню (рис 2.45) в верхнем поле *Face* (2 на рис 2.45) выбирается делимая поверхность, в нижнем поле *Face* (3 на рис 2.45) выбирается делящая фигура. При этом кнопка *Retain* не должна быть нажата. Это приведет к тому, что делящая поверхность будет удалена после завершения операции. В противном случае образуется два круга с радиусом 80.

Шаг 19. Аналогичным образом круг радиусом 80 делится кругом радиусом 50.

Шаг. 20. Из круга радиусом 50 вычитается круг наименьшего диаметра (команда  →  → ). Эту операцию можно выполнить альтернативным путем. Для этого нужно с помощью команды *Split Faces* (команда  →  → ) разделить круг радиусом 50 кругом радиусом 35 аналогично тому, как это делалось в шагах 18 и 19. После этого следует удалить круг наименьшего диаметра (команда  →  → ).

После этого будет полезным посмотреть результат последних действий, нажав на кнопку , и убедиться, что все выполнено верно.

Шаг 21. Из кольцевой поверхности вычитаются лопатки (команда  →  → ). Для выделения лопаток можно использовать меню выбора поверхностей (см. раздел 1.4 и рис. 1.17) или рамку выбора, которая создается движением мыши справа налево с нажатой левой кнопкой и клавишей *Shift*. Кольцевая поверхность с вычтенными лопатками в дальнейшем в решателе будет описана как отдельная зона, находящаяся в подвижной СК.

После выполнения всех перечисленных действий следует убедиться, что осталось только три поверхности. Результат всех действий показан на рис. 2.78.

Шаг. 22. Созданная модель сохраняется с помощью команды *BM: File* → *Save*.

2.9.4. Пример построения объемной расчетной модели обтекания зонда

В данном примере рассматривается построение трехмерной модели течения через зонд. Данный пример предназначен для закрепления навыков, полученных в предыдущих упражнениях. Поэтому он содержит минимально необходимые комментарии.

Внешний вид модели, которую предлагается построить представлен на рис. 2.84.

Поток поступает в круглый канал слева, обтекает зонд и держатель и выходит через круглый торец справа. Для понимания формы канала на рис. 2.85 приводится картина распределения векторов скорости в нем. Обратите внимание на то, что расчетная модель содержит только поток обтекающий объект и не содержит его элементов. Та область пространства, где находится обтекаемый объект в расчетной модели пустая.

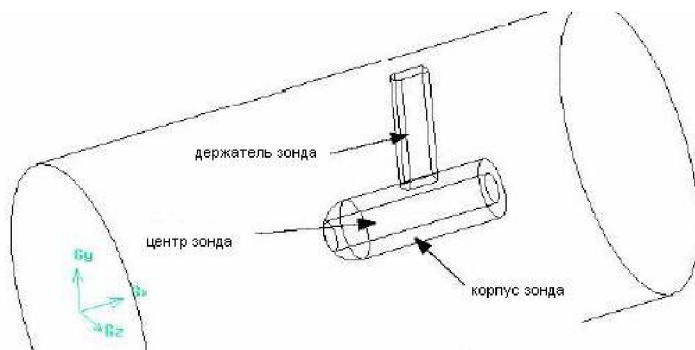


Рис. 2.84. Внешний вид расчетной модели течения через зонд

Расчетная модель не является сложной и может быть построена с помощью примитивной геометрии. Создание расчетной модели предлагается выполнять в следующей последовательности.

Шаг 1. Строится цилиндр вдоль положительного направления оси OX (*positive x*) с высотой равной 20 единицам и радиусом основания - 5

(команда  →  → ).

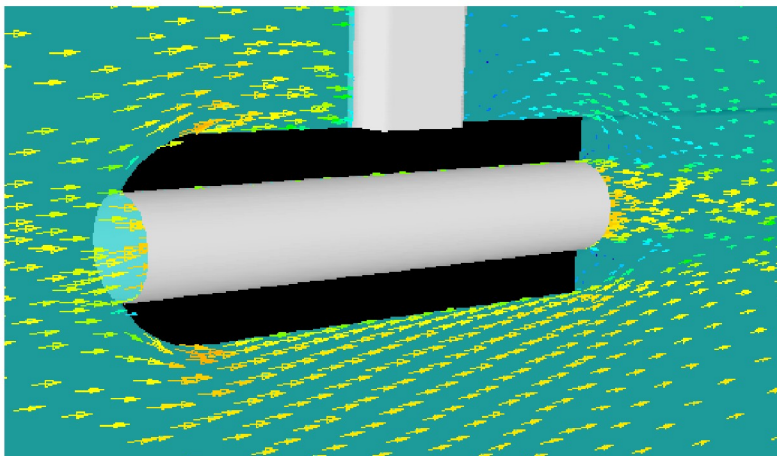


Рис. 2.85. Вектора скорости в рассматриваемом канале

Шаг 2. Строится цилиндр вдоль положительного направления оси OX высотой 5 единиц и радиусом основания 1.

Шаг 3. Цилиндр, построенный последним, перемещается на 10 единиц вдоль положительного направления оси OX (команда ).

Шаг 4. Строится сфера радиусом 1 (команда ) и перемещается на 10 единиц вдоль положительного направления оси OX .

Шаг 5. Маленький цилиндр и сфера объединяются в один объем, образуя наружную поверхность зонда (команда ).

Шаг 6. Строится параллелепипед шириной 1 (*Width*), длиной 5 (*Depth*) и высотой 0,5 (*Height*) с центром в начале координат (команда ) ).

Шаг 7. Строится цилиндр с высотой 5 единиц и радиусом основания 0,5, располагающийся вдоль оси OY так, что начало координат находится в его центре (*Centered-Y direction*).

Шаг 8. Последний созданный цилиндр перемещается на 0,5 единиц в отрицательном направлении вдоль оси OX .

Шаг 9. В единый объем объединяются цилиндр, созданный последним, и параллелепипед, построенный в шаге 5, образуя державку.

Шаг 10. Полученная фигура перемещается на 12,5 единиц в положительном направлении вдоль оси OX и на 3 единицы в положительном направлении вдоль оси OZ .

Шаг 11. Строится цилиндр, расположенный вдоль положительного направления оси OX , длиной 10 единиц и радиусом основания 0,5. Он перемещается на 7 единиц в положительном направлении вдоль оси OX .

Шаг 12. Зонд и державка объединяются в одно тело. Из него вычитается цилиндр, созданный на шаге 11 (команда  →  → ).

Шаг 13. Полученная фигура вычитается из большего цилиндра.

Шаг 14. Создается плоскость, лежащая на плоскости XOY (xy centred) заведомо большая полученной модели, например с размерами 100x100 (команда  →  → ).

Шаг 15. С помощью плоскости построенная модель делится на 2 части (команда  →  → ).

Шаг 16. Одна из половин модели удаляется (команда  →  → ) или делается невидимой  (см. раздел 1.2).

Шаг 17. Созданная расчетная модель сохраняется.

3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ В ПРОГРАММЕ GAMBIT

3.1. Основные подходы к разбиению расчетной области на конечные элементы

Для определения параметров потока в программе *Fluent* решается система дифференциальных уравнений. По ряду причин решить эту систему можно только численными методами. Их использование заключается в замене непрерывного решения исходных дифференциальных уравнений алгебраическими аналогами в окрестностях произвольной точки расчетной области. Следовательно, для замены исходных уравнений на алгебраические уравнения необходимо задать точки, вблизи которых будет происходить эта замена. В *CAE* программах широко применяется подход, когда эти точки получаются в результате разбиения расчетной области сеткой конечных элементов. Такой же принцип применяется в программном комплексе *Fluent*. Расчетная область разбивается на конечные элементы, причем точка, вблизи которой дифференциальные уравнения заменяются алгебраическими, находится в центре ячейки. Этот процесс является очень важным, поскольку от него существенно зависит правильность полученного решения [2].

Построение конечно-элементной сетки осуществляется в пре-процессоре *Gambit* на базе существующей геометрии расчетной области.

Прежде чем приступить к описанию построения сетки, определим терминологию, которой будем при этом пользоваться.

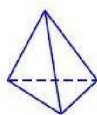


Треугольный КЭ

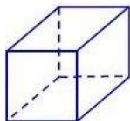


Четырехугольный КЭ

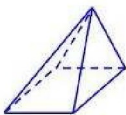
Рис. 3.1. Основные типы двумерных конечных элементов



Тетраэдральный КЭ



Гексаэдральный КЭ



Пирамидальный КЭ



Призматический КЭ

Рис. 3.2. Основные типы трехмерных конечных элементов

Итак, конечноэлементная ячейка образуется пересечением сеточных линий и может быть двух или трехмерной. Основные типы КЭ, применяемых в программе *Gambit*, показаны на рис. 3.1 и 3.2. По своей форме двумерная ячейка может быть трех или четырехугольной (рис. 3.1), а также полиэдральной (данный тип сетки создается в программе *Fluent* на базе треугольной сетки). Трехмерная ячейка имеет четыре и более граней. В отличие от КЭ, используемых в других программах (например, *Ansys*), количество узлов в ячейке важно только при вычислении градиентов параметров.

метров.

Конечноэлементная сетка, применяемая в расчетах в программном комплексе *Fluent*, состоит из следующих элементов:

- в двумерном случае: центра ячейки, узлов, ребер и ячеек (*cell center, node, edge, cell*) (рис. 3.3);

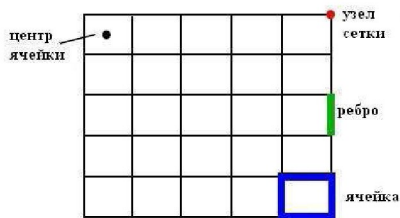


Рис. 3.3. Основные элементы двумерной конечноэлементной сетки

- в трехмерном случае: центра ячейки, узлов, ребер, граней и ячеек (*cell center, node, edge, face, cell*) (рис. 3.4).

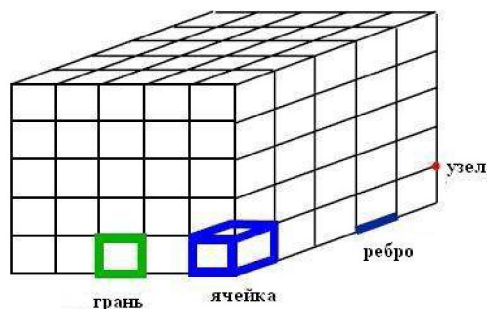


Рис. 3.4. Основные элементы трехмерной конечноэлементной сетки

Методика построения конечноэлементной сетки в программе *Gambit* мало отличается от методики построения сеток в других *CAE* программах и может быть осуществлена следующими тремя способами.

1. Автоматическое построение. Оно осуществляется штатными программными средствами без участия пользователя. В этом случае программа анализирует форму и размеры объекта и пробует наложить сетку наиболее простым способом. В большинстве случаев таким способом можно построить только неструктурированную сетку при относительно простой форме геометрии.
2. Полуавтоматическое построение. При этом участие пользователя заключается в назначении размера ячейки, мест сгущения сетки или числа конечных элементов. Основываясь на введенных параметрах, программа строит сетку. В большинстве случаев она также получается неструктурированной, но более высокого качества, чем в первом случае.
3. Сетка строится пользователем. В этом случае построение производится непосредственно расчетчиком от простого элемента к сложному, начиная с ребер и заканчивая объемами. В данном случае процесс разбиения расчетной области может включать в себя дополнительные операции декомпозиции геометрии на блоки, которые можно разбить структурно, а также дополнительные команды управления разбиением.

Первые два метода, как правило, не позволяют построить структурную сетку, что отрицательно сказывается на точности расчета. Поэтому для точных расчетов следует пользоваться третьим способом. Однако процесс построения качественной структурной сетки кропотлив, трудоемок, требует от пользователя определенной квалификации. По имеющимся сведениям и опыту авторов книги процесс наложения качественной структурной сетки может занимать до 80% времени решения задачи. Тем не менее, значительно возрастающая точность расчета оправдывает эти затраты.

При построении конечноэлементных сеток следует придерживаться двух основных правил [1,7,11.14]:

- в области повышенных градиентов (скорости, давления, температуры) необходимо применять сетку повышенной плотности (густоты);
- грани конечных элементов должны быть сориентированы по линиям тока рабочего тела.

Для выполнения второго правила предпочтительнее использовать гексаэдральные конечные элементы в трехмерных расчетных моделях и четырехугольные - в двухмерных. Причем эти элементы следует ориентировать так, чтобы одна часть их граней была параллельна потоку, другая перпендикулярна. Однако реальная конфигурация расчетной области может существенно осложнить выполнение последнего требования.

3.2. Разбиение на конечные элементы расчетной области в программе *Gambit*

Меню работы с расчетными конечноэлементными сетками показано на рис. 3.5. Доступ к нему открывается нажатием кнопки  в главном меню. В меню, изображенном на рис. 3.5 находятся кнопки, открывающие доступ к группам команд построения и редактирования сетки в пограничном слое , на линии , поверхности , в объеме  и на группах .

Рассмотрим типичную структуру меню построения и редактирования сетки на примере меню *Mash Face* (разбиения поверхности на КЭ) (рис. 3.6).

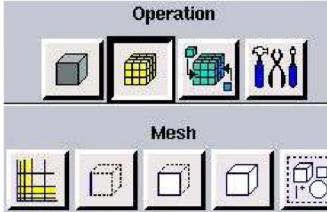
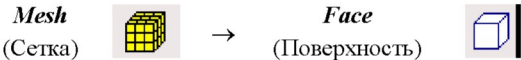
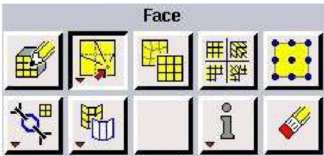


Рис 3.5. Меню построения расчетной сетки



Данное меню является наиболее общим и показательным. Меню построения и редактирования сеток на линиях и объемах имеют ту же структуру, но в них доступно меньшее число команд.

Как видно из рис. 3.6, меню построения и редактирования сеток состоит из нескольких кнопок, открывающих доступ к соответствующим командам. Щелчок на кнопках правой клавишей мыши (в случае, если на кнопке есть красный треугольник слева внизу) откроет доступ к командам схожего содержания.



Построение сетки на элементе	Изменение положения узлов ячейки	Сглаживание сетки	Изменение атрибутов точек	Изменение числа узлов конечного элемента
Связывание/разъединение сеток (link)	Преобразование сетки в поверхность		Информация о сетке	Удаление сетки

Рис 3.6. Типичная структура меню построения и редактирования конечных элементов

Для конечноэлементной сетки на поверхности доступны следующие команды (рис 3.6).

Построение конечноэлементной сетки на объекте . Команда осуществляет построение сетки на выделенном элементе. Она содержит

ряд настроек, позволяющих управлять процессом разбиения. Подробнее работа с командой применительно к разным геометрическим объектам будет рассмотрена ниже. Эта команда может применяться для всех элементов геометрии.

Изменение положения узлов ячейки . Команда позволяет пользователю изменить положение любого узла ячейки на необходимое. В этой же позиции находится команда **Split Quad Meshes** , позволяющая построить на базе четырехугольной сетки треугольную повышенного качества. Треугольная сетка получается делением четырехугольных элементов диагоналями (рис. 3.7). Эта команда доступна только для поверхностей.

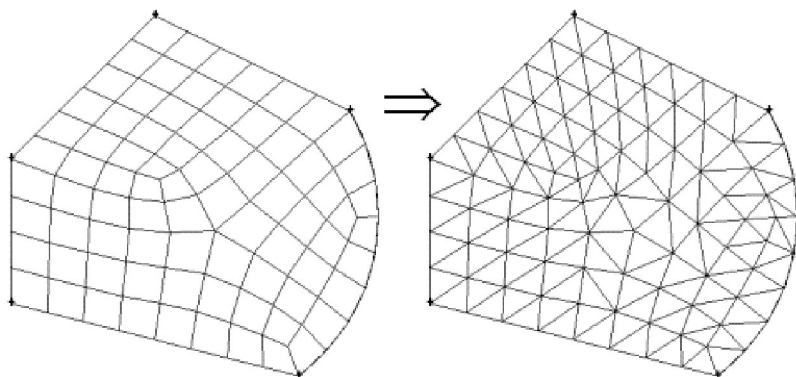


Рис. 3.7. Результат действия команды *Split Quad Meshes*

Сглаживание сетки . Команда позволяет сгладить сетку конечных элементов. Действие команды проиллюстрировано на рис. 3.8. Она применяется для поверхностной и объемной сетки.

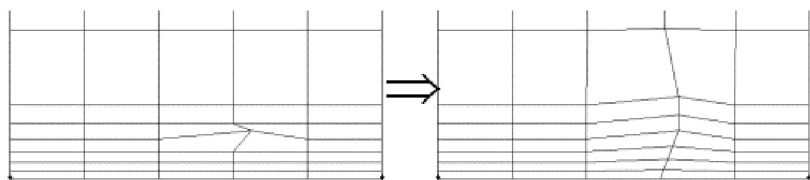


Рис. 3.8. Результат сглаживания сетки

Редактирование атрибутов точек . Команда позволяет изменить атрибуты точек, что дает возможность управлять процессом разбиения поверхностей и строить структурные сетки. Подробнее назначение команды и работа с ней будет рассмотрена в подразделе 3.6. Команда доступна только для поверхностей.

Изменение числа узлов ячейки конечного элемента . По умолчанию каждый конечный элемент имеет узлы только в своих вершинах. Данная команда позволяет строить дополнительные узлы на гранях и в центре ячеек, что позволяет точнее учитывать градиенты изменения параметров. Действие команды на примере поверхностей показано на рис. 3.9. Изменение числа узлов на гранях в трехмерных ячейках происходит по тому же принципу. Команда доступна для поверхностей и объемов.

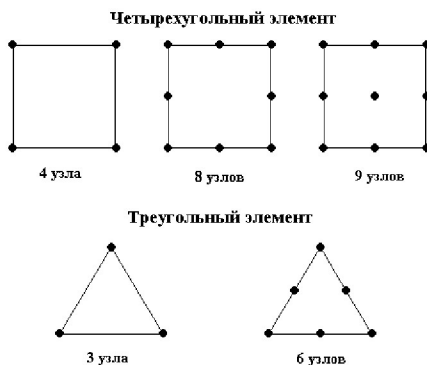


Рис. 3.9. Возможное расположение узлов конечноэлементной сетки на плоских элементах

Связывание  / **разъединение**  **сетки**. Команда связывает сетки на элементах с одинаковой геометрией. В результате на них накладывается идентичная сетка. Связывание является необходимым условием для задания периодических граничных условий, а также может применяться при упрощении разбиения одинаковых элементов. Под-

робнее работа с командой будет рассмотрена ниже. Она доступна для линий, поверхностей и объемов.

Преобразование сетки в геометрический объект . С помощью данной команды на базе существующей сетки может быть создан геометрический объект. В этой же позиции находится команда разделения

поверхности по узлам конечноэлементной сетки . Она позволяет разделить разбитую на конечные элементы поверхность на две виртуальных ломаной линией, которая задается узлами ячеек, принадлежащих поверхности. Действие команды показано на рис. 3.10.

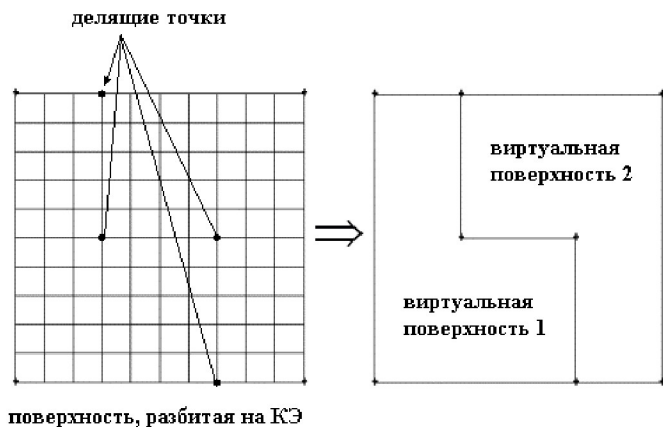


Рис. 3.10. Действие команды деления поверхности по узлам сетки

Выдача информации о сетке . Команда дает информацию о конечноэлементной сетке: число ячеек, узлов, граней и т.п. Кроме того, в этой же позиции находится команда Check , позволяющая проверить построенную сетку на наличие ошибок. Обе команды доступны для всех элементов.

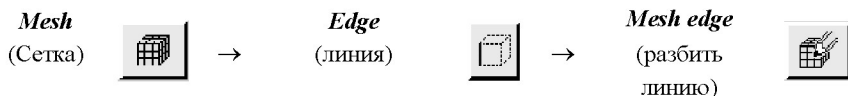
Удаление сетки . Команда удаляет существующую сетку с выделенного элемента. Подробнее работа с командой будет рассмотрена ниже. Команда доступна для всех элементов.

Меню построения и редактирования сеток на линиях, объемах и группах имеют схожую структуру и команды. Остановимся на основных действиях с конечно-элементной сеткой подробнее.

Внимание! При работе с сеткой вначале обязательно нужно выбрать объект, над которым производятся действия, а лишь затем делать настройки в меню. Если же выбор элемента проводить после настроек, то они будут сброшены.

3.2.1. Разбиение линий на конечные элементы

Разбиение линий на конечные элементы осуществляется с помощью команды:



Меню команды показано на рис. 3.11. В этом меню в поле *Edges* (позиция 1) выбирается одна или несколько линий, которые предполагается разбить. При выборе нескольких линий, если активна опция *Pick with links* они будут связаны. Если одна из них в дальнейшем будет выбрана вновь для разбиения, автоматически будут выбраны и остальные линии, связанные с ней. В ряде случаев это доставляет определенное неудобство.

Выбранная линия выделяется красным цветом с белыми окружностями (рис. 3.12), расположение которых показывает как будут располагаться узлы конечноэлементной сетки в соответствии со сделанными настройками. В случае их изменения, окружности скорректируют свое положение по новым значениям, что очень удобно и наглядно. Обратите внимание на то, что линия имеет направление, обозначенное стрелкой в центральной части. Оно имеет значение при сгущении сетки к одному из концов линии. Для того, чтобы изменить направление линии необходимо нажать кнопку *Reverse* под полем *Edges*, либо щелкнуть на линии средней клавишей мыши с нажатой клавишей *Shift*.

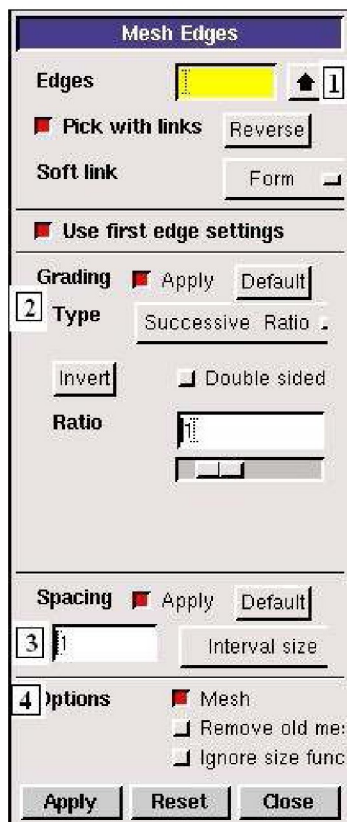


Рис. 3.11. Меню разбиения
линий на конечные элементы

В поле *Grading* в меню построения сетки на линии (позиция 2 на рис. 3.11) задаются параметры сгущения сетки. Программа *Gambit* позволяет сгущать сетку как к одному, так и одновременно к двум концам линии. Для того, чтобы получить доступ к опциям настройки сгущения, нужно нажать кнопку *Apply* в поле *Grading*. Управлять процессом сгущения можно с помощью полосы прокрутки под полем *Ratio*. Передвигая бегунок можно увидеть, что сетка у одного конца линии становится гуще (рис. 3.12, а). При этом общее число элементов на линии не меняется. Более точно задать величину сгущения сетки можно, введя коэффициент роста в поле *Ratio*. Он показывает, во сколько раз следующий элемент будет больше предыдущего. Если сгущение сетки произошло не у требуемого конца отрезка, а у противоположного, нужно нажать кнопку *Invert* (рис. 3.12, б).

Если нажать кнопку *Double sided*, сгущение будет осуществляться у обоих концов линии (рис. 3.12, в). При этом появится второе поле *Ratio* и вторая полоса прокрутки, что позволяет сгустить сетку у разных концов линии на различную величину.



Рис. 3.12. Разные варианты сгущения сетки на линии

В поле *Type* находится список, в котором можно выбрать закономерность, по которой будет происходить сгущение сетки.

Количество конечных элементов, на которое будет разделена линия, определяется в поле *Spacing* (позиция 3 на рис. 3.11). Если в этом поле кнопка *Apply* не нажата, то программа определит число элементов и разобьет линию в автоматическом режиме. Если кнопка *Apply* нажата, то число конечных элементов определяется пользователем.

Количество конечных элементов, на которое будет разделена линия, может быть задано тремя способами:

- *Interval count* – заданием числа конечных элементов на выбранной линии;
- *Interval size* – непосредственно заданием размера конечного элемента;
- *Shortest edge.%* – размер элемента задается в виде процента от длины линии.

Выбор способа определения размера конечного элемента осуществляется в списке поля *Spacing*.

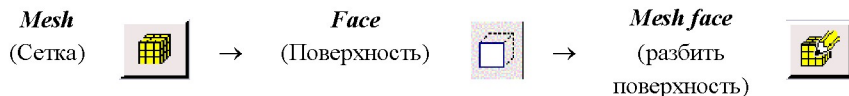
В нижней части меню команды разбиения линии на конечные элементы (позиция 4 на рис. 3.11) располагается несколько дополнительных опций:

- *Mesh*. Если эта опция активна, то построенная сетка будет изображена в графическом окне. Если она не активна – сетка будет построена, но не отображена;
- *Remove old mash*. Активация этой опции приводит к удалению старой сетки перед построением новой, если она была нанесена ранее на объект;
- *Ignore size function*. При активации этой опции, размерная функция (назначение и настройки размерной функции описаны ниже), если она была задана, будет игнорироваться при нанесении сетки.

После того, как все настройки сделаны, команда запускается нажатием кнопки *Apply*. Нажатие кнопки *Reset* вернет настройки команды, установленные в программе по умолчанию.

3.2.2. Разбиение поверхностей на конечные элементы

Разбиение поверхностей на конечные элементы осуществляется с помощью команды:



Меню этой команды показано на рис. 3.13. Обратите внимание на то, что оно во многом повторяет меню построения сетки на линии.

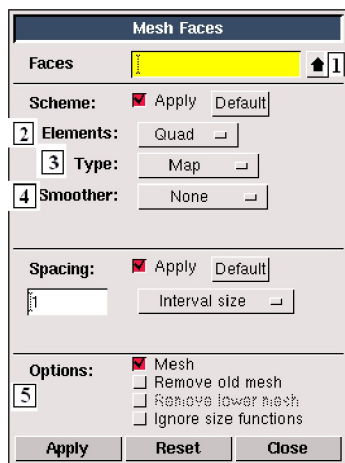


Рис. 3.13. Меню разбиения поверхностей на конечные элементы

Для разбиения поверхности на конечные элементы необходимо вначале выбрать ее в поле *Faces* (позиция 1 на рис. 3.13) в меню *Mesh Face*.

Выбор размера ячеек, на которые делится поверхность, осуществляется в поле *Spacing* подобно тому, как это делалось при разбиении линии. Здесь формально доступны те же три способа назначения размера элемента, что и при разбиении линии. Однако на практике чаще всего размер конечного элемента

задают непосредственным вводом его величины (*Interval size*). Следует отметить, что при этом грани поверхности будут разбиты в соответствии с выбранными настройками, причем сетка на них будет равномерной. Для того, чтобы сгустить сетку в требуемых местах необходимо предварительное разбиение ребер с помощью команды *Mesh Edge*.

Ниже поля *Faces* находится поле *Scheme*, в котором определяется каким типом конечных элементов будет разбита поверхность и по какой схеме (принципу).

Поверхность может быть разбита треугольной (*TRI*), четырехугольной (*QUAD*) и смешанной (*QUAD+TRI*) сеткой. Выбор типа элементов осуществляется в списке *Elements* (позиция 2 на рис. 3.13).

Ниже поля *Elements* находится поле *Type* (позиция 3 на рис. 3.13), в котором располагается список выбора схемы разбиения поверхности. Схема определяет закономерность, в соответствии с которой будет осуществляться построение сетки. Для четырехугольных элементов доступны следующие схемы:

- *MAP* – структурированная сетка;
- *SUBMAP* – блочно-структурированная сетка;
- *TRI PRIMITIVE* – блочно-структурная схема для поверхностей треугольной топологии;
- *PAVE* – неструктурированная сетка.

Для треугольных элементов доступны следующие схемы:

- *MAP SPLIT* – сетка, получаемая из четырехугольной *MAP* сетки разделением ячеек диагональю, подобно тому как показано на рис. 3.7;
- *SUBMAP SPLIT* сетка, получаемая из четырехугольной *SUBMAP* сетки разделением ячеек диагональю, подобно тому как показано на рис. 3.7;
- *PAVE* – неструктурированная сетка.

Для сетки смешанных элементов доступны следующие схемы разбиения:

- *MAP* – структурированная сетка;
- *PAVE* – неструктурированная сетка;
- *WEDGE PRIMITIVE* – структурное разбиение треугольной расчетной области четырехугольными элементами с треугольными элементами вблизи одного из углов.

Как видно из приведенных данных, для всех используемых типов ячеек схема *Pave* является неструктурной. Остальные типы - структурные. Подробнее о схемах разбиения и построении структурной сетки будет рассказано в разделе 3.6.

Опция *Smoother* (позиция 4 на рис. 3.13) позволяет сглаживать сетку в процессе разбиения.

В нижней части меню рассматриваемой команды доступны дополнительные опции управления процессом разбиения (позиция 5 на рис. 3.13). Эти опции совпадают по названию и действию с опциями в меню построения сетки на линии, за исключением наличия дополнительной опции *Remove lower mesh*. Ее активация приведет к тому, что при разбиении поверхности будет игнорироваться предварительное разбиение ее боковых ребер.

После того, как все настройки сделаны, команда запускается нажатием кнопки *Apply*. Нажатие кнопки *Reset* вернет настройки команды, установленные в программе по умолчанию.

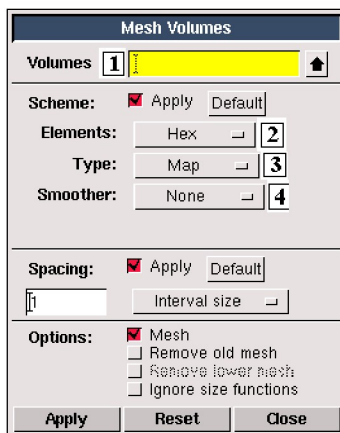
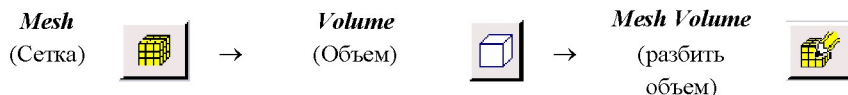


Рис. 3.14. Меню разбиения объемов на конечные элементы

3.2.3. Разбиение объемов на конечные элементы

Разбиение объемов на конечные элементы осуществляется с помощью команды:



Меню этой команды показано на рис. 3.14. Оно во многом повторяет меню разбиения поверхностей. Определение числа или размера конечного элемента в обоих меню происходит одинаково. Дополнительные опции, доступные в нижней части меню, также одинаковы.

Как и в меню построения конечноэлементной сетки на поверхности, настройка параметров разбиения осуществляется в поле *Scheme*. В нем в

списке *Elements* (позиция 2 на рис. 3.14) осуществляется выбор типа конечноэлементных ячеек, которые будут применяться при разбиении объема. Всего доступны три типа ячеек:

- *HEX* – объем будет разбит гексаэдрами;
- *HEX/WADGE* - объем будет разбит гексаэдрами и призмами;
- *TET/GIBRID* - объем будет разбит тетраэдрами, пирамидами или призмами.

Ниже поля *Elements* находится поле *Type* (позиция 3 на рис. 3.14), в котором находится список выбора схемы разбиения поверхности. Схема определяет закономерность, в соответствии с которой будет осуществляться построение сетки. Для гексаэдральных элементов (*HEX*) доступны следующие схемы разбиения:

- *MAP* – структурная сетка;
- *SUBMAP* – блочно - структурная сетка;
- *TET PRIMITIVE* – блочно - структурная сетка для объемов тетраэдральной топологии;
- *COOPER* – структурная сетка, получаемая проецированием сетки с одних граней объема на противоположные;
- *STAIRSTEP* –заполнение объема слоями ячеек (рис. 3.15). Эта схема разбиения применяется редко.

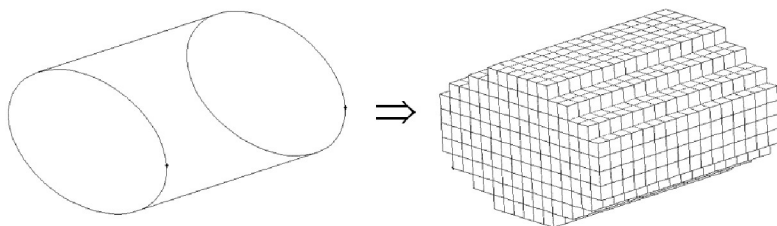


Рис. 3.15. Разбиение цилиндрического объема по схеме *STAIRSTEP*

Конечноэлементная сетка, состоящая из гексаэдральных и призматических элементов (*HEX/WADGE*), может быть разбита только по схеме *COOPER*.

Для сетки на основе тетраэдров, пирамид и призм (*TET/HYBRID*) доступны два метода разбиения:

- *TGRID* – неструктурная сетка, построенная универсальным методом послойной укладки элементов в объем;
- *HEX CORE* – построение неструктурной сетки с областью, разбитой гексаэдральной сеткой внутри объема (рис. 3.16).

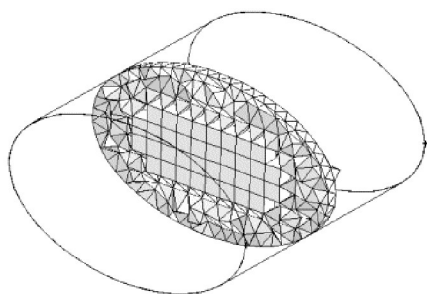


Рис. 3.16. Конечноэлементная сетка в центральной части цилиндрического объема, разбитого по схеме *HEX CORE*

После того, как все настройки сделаны, команда запускается нажатием кнопки *Apply*. Нажатие кнопки *Reset* вернет настройки команды, установленные в программе по умолчанию.

3.2.4. Связанное разбиение элементов геометрии

Как отмечалось выше, для корректного задания периодического граничного

условия необходимо, чтобы данные границы имели связанную конечно-элементную сетку. Связанные объекты разбиваются на конечные элементы строго одинаково. Связывание сеток двух или более элементов

осуществляется с помощью команды *Link* . Связать сетки можно только на элементах с одинаковой геометрией. Если на связанный элемент наложить конечноэлементную сетку, то второй разобьется автоматически.

Следует также отметить, что связь сеток накладывает ограничения на операции с геометрией. Например, элементы, на которые наложена связь, нельзя объединять, делить, складывать, вычитать и т.д. Для проведения

этих операций связь необходимо убрать с помощью команды *Unlink* .

Установить связь разбиения на линиях можно с помощью команды:

Mesh → *Edge* → *Link edge*

(Сетка)



(линия)



(связать
линии)



Меню команды показано на рис. 3.17. Работа с ним не составляет сложностей. В поле *Edges* необходимо выбрать связываемые линии (не мене двух) и нажать кнопку *Apply*.

Опцию *Periodic* следует активировать в случае, если на связанные линии будет впоследствии установлено периодическое граничное условие.

Связь конечноэлементных сеток на разных поверхностях можно установить с помощью команды:

Mesh

(Сетка)



Face

(Поверхность)



Link face

(связать
поверхности)



Меню команды показано на рис. 3.18. Эта команда позволяет связать только пару поверхностей. В данном меню в верхнем поле *Face* (позиция 1) следует выбрать одну из связываемых поверхностей. В нижнем поле *Face* (позиция 3) – другую. В верхнем поле *Vertices* (позиция 2) нужно

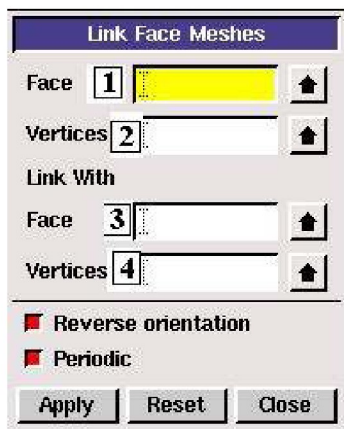


Рис. 3.18. Меню связывания конечноэлементных сеток двух поверхностей

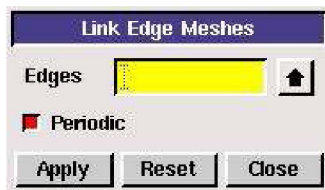


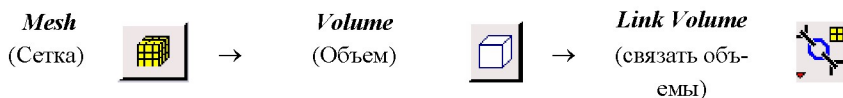
Рис. 3.17. Меню связывания конечноэлементных сеток линий

указать произвольную точку, принадлежащую первой поверхности. В нижнем поле *Vertices* (позиция 4) – одноименную точку второй поверхности.

Обратите внимание, что при выделении поверхности ее контур выделяется красным цветом, причем на

них видны стрелки, задающие направление обхода. Если направление стрелок на выбранных поверхностях противоположны, нужно активировать опцию *Reverse orientation* в нижней части меню.

Связь сеток на объемах устанавливается с помощью команды:



Меню команды показано на рис. 3.19. В нем в полях *Volume* необходимо выбрать связываемые объемы. Запускается команда нажатием кнопки *Apply*.

Командой обратной *Link*  является команда *Unlink* , которая удаляет связи между сетками различных элементов. Меню команды для разных геометрических объектов выглядит одинаково и приведено на рис. 3.20. В нем необходимо выбрать элементы, связи на которых нужно удалить, и нажать кнопку *Apply*. Если не активировать опцию *Lower topology*, то связь будет удалена только на выделенных геометрических объектах. Составляющие их элементы низшего порядка останутся связанными.

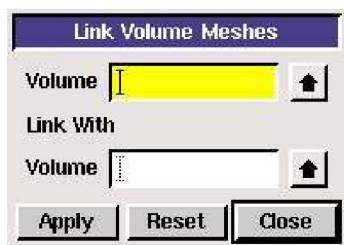


Рис. 3.19. Меню связывания конечноэлементных сеток двух объемов



Рис. 3.20. Меню команды удаления связей конечноэлементных сеток

3.2.5. Удаление сеток

Удаление конечноэлементной сетки с выделенного элемента геометрии осуществляется с помощью команды *Delete Meshes* . Доступ к ней осуществляется нажатием крайней правой кнопкой в нижнем ряду в меню построения и редактирования сетки (рис 3.6). Меню команды *Delete Meshes* показано на рис. 3.21.

Работа с командой не вызывает сложностей. С помощью мыши выбираются объекты, сетку на которых необходимо удалить, затем кнопкой *Apply* подтверждается выполнение действия. Если в меню *Delete Meshes* активировать опцию *Remove unused lower mesh*, то сетка будет удалена вместе с сетками принадлежащими объектам низших топологий, за исключением тех, которые используются другими объектами. Если эта опция не активна, то будет удалена сетка только с выбранного объекта, сетки низших элементов будут сохранены.

3.3. Структурное разбиение пристеночных областей

Для получения качественного решения необходимо особенно тщательно подходить к построению сетки в местах с большими градиентами параметров. В первую очередь это относится к пограничным слоям на обтекаемых объектах или стенках каналов. Для построения высококачественной сетки в пристеночных зонах в программе *Gambit*

имеется команда *Boundary Layers* . Сетка, построенная с ее использованием, позволяет учитывать явления в пограничном слое с большей точностью при меньшем потребном числе конечных элементов. Упорядоченное разбиение пограничного слоя может использоваться при решении как двумерных, так и трехмерных задач. Пристеночные сетки могут быть построены как для расчетных моделей со структурной сеткой, так и

неструктурной (рис. 3.22). В любом случае сетка состоит из двух блоков: упорядоченной сетки вблизи обтекаемых элементов, построенной с помощью команды *Boundary Layers*, и сетки в остальной части расчетной области. Использование упорядоченного разбиения пристеночных слоев позволяет существенно повысить точность расчета на неструктурной сетке.



Рис. 3.21. Меню *Delete Meshes*

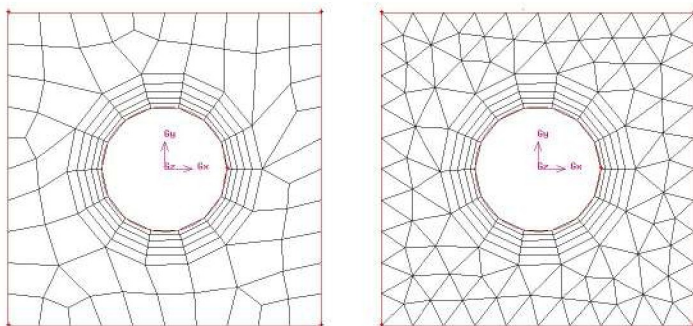
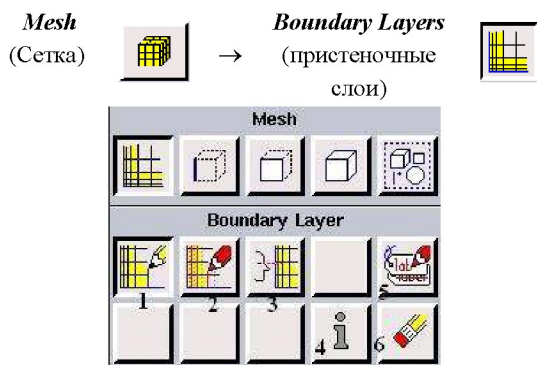


Рис. 3.22. Применение упорядоченного разбиения пристеночных слоев с неструктурной сеткой

Доступ к меню *Boundary Layers* (рис. 3.23) осуществляется следующим образом:



1. Построение пристеночного слоя	2. Редактирование пристеночного слоя	3. Просмотр трехмерного пристеночного слоя		5. Изменение названия пристеночного слоя
			4. Информация о пристеночном слое	6. Удаление пристеночного слоя

Рис. 3.23. Меню *Boundary Layers*

Как видно из рис. 3.23, меню состоит из нескольких кнопок, открывающих доступ к подменю создания и редактирования конечноэлементной сетки в пристеночных зонах.

Рассмотрим подменю построения упорядоченной сетки в пристеночной зоне, которое показано на рис. 3.24.

В его верхней части приводится изображение (позиция 1), на котором дана схема пограничного слоя согласно текущим настройкам и проставлены характерные размеры. Для того, чтобы описать упорядоченную сетку в пристеночной зоне, в этом меню необходимо сделать следующие настройки.

В поле *Attachment* (позиция 2) выбираются геометрические объекты, на которых будут строиться простеночные слои. Они могут быть созданы только на линиях (для двухмерных расчетных моделей) и на поверхностях (для трехмерных).

Настройка параметров сгущения сетки в пристеночной зоне осуществляется в поле *Definition*. В его верхней части находится список *Algorithm*, с помощью которого может быть выбран алгоритм сгущения сетки. Всего доступно три алгоритма:

- *Uniform* – в этом случае для задания сгущения используется размер пристеночной ячейки, коэффициент показывающий во сколько следующий от стенки элемент больше предыдущего и число пристеночных элементов или глубина пристеночно слоя;
- *Aspect ratio (first)* – этот способ аналогичен предыдущему. Единственное отличие заключается в том, что вместо толщины первого от стенки элемента задается отношение его сторон;

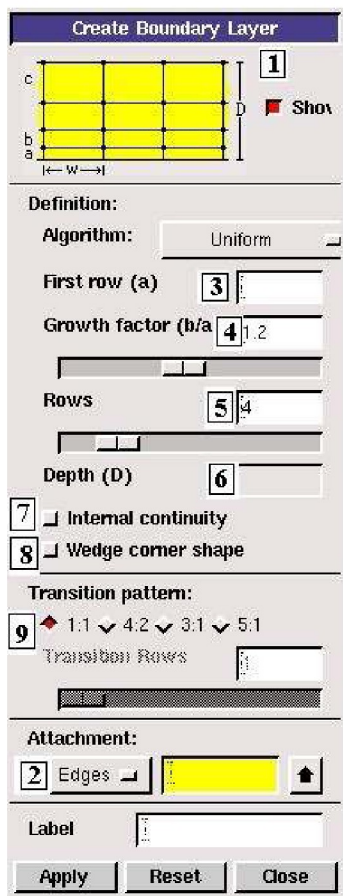


Рис. 3.24. Подменю построения пристеночного слоя

- *Aspect ratio (last)* – в этом случае для задания сгущения задается размер пристеночной ячейки, число ячеек в пристеночной зоне и отношение сторон дальнего от стенки элемента зоны.

На рис. 3.24 показано меню для создания упорядоченной сетки в пристеночной зоне с помощью алгоритма *Uniform*.

В поле *First row* (3 на рис. 3.24) вводится толщина первого от стенки слоя конечноэлементных ячеек. Она выбирается исходя из общей толщины погранслоя. При использовании в расчете моделей турбулентности Рейнольдса и $k-\epsilon$ размер первой ячейки равен толщине погранслоя. При использовании моделей Спаларта–Алламарса или $k-\omega$ в пограничном слое должно быть не менее 10 элементов в направлении перпендикулярном стенке. Примерная толщина пограничного слоя может быть найдена по известному соотношению [11,14]:

$$\delta = 5 \sqrt{\frac{\nu}{U}},$$

где ν - кинематическая вязкость;

U – скорость в ядре потока.

В поле *Growth factor* (4 на рис. 3.24) вводится параметр роста ячейки. Он показывает, во сколько раз размер в направлении перпендикулярном стенке следующего элемента больше размера предыдущего.

В поле *Rows* (5 на рис. 3.24) указывается число конечных элементов в пристеночном слое в направлении перпендикулярном стенке.

В поле *Depth* (6 на рис. 3.24) указывается ширина пристеночной зоны с упорядоченной сеткой. Поля *Rows* и *Depth* являются взаимно дополняющими и можно задавать значения соответствующих параметров только в одном из них.

Опция *Internal continuity* (7 на рис. 3.24) определяет вид сопряжения двух пристеночных слоев на линиях, пересекающихся в точке с атрибутом *End*. Если эта опция не активна, то пристеночные слои пересекаются. Если опция активна, то слои не пересекаются. Действие опции показано на рис. 3.25.

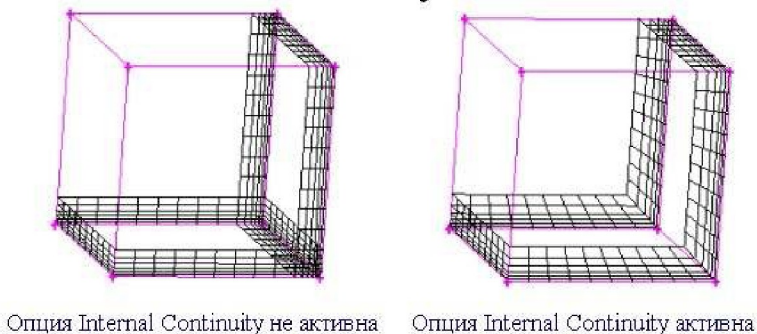


Рис. 3.25. Действие опции *Internal continuity*

Опция *Wedge corner shape* (8 на рис. 3.24) определяет как будет происходить сопряжение двух пристеночных слоев на линиях, пересекающихся в точке с атрибутами *Corner* или *Reverse*. Если опция не активна, то пристеночные слои просто пересекаются. Если она активна, то слои в месте пересечения сглаживаются. Действие опции показано на рис. 3.26.

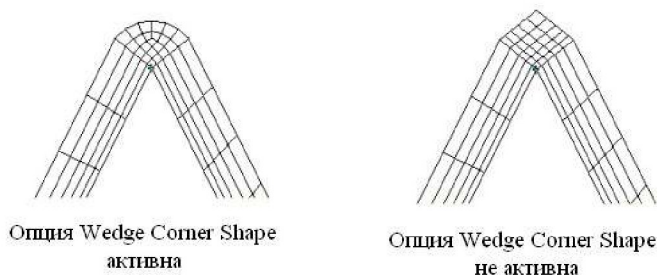


Рис 3.26. Действие опции *Wedge corner shape*

В поле *Transition pattern* (9 на рис. 3.24) определяется сгущение сетки в направлении параллельном стенке. Сгущение задается в виде соотношения из двух цифр, например $1:1$. Оно показывает отношение числа элементов в направлении потока на границе пристеночной зоны, примыкающей к стенке, к числу конечных элементов на противоположной границе. Действие опции показано на рис. 3.27.

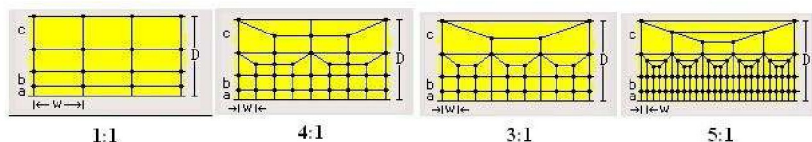


Рис. 3.27. Действие опции *Transition pattern*

В процессе задания параметров упорядоченной сетки в пристеночной зоне она отображается на выбранных элементах геометрии.

После того, как все настройки сделаны, команда запускается нажатием кнопки *Apply*.

Остальные действия с упорядоченной сеткой в пристеночной зоне не отличаются от аналогичных действий с геометрическими объектами и сеткой.

3.4. Сгущение конечноэлементной сетки с помощью размерной функции (*Size Function*)

Как отмечалось ранее, для получения качественных решений в местах с большими градиентами изменения параметров конечноэлементные сетки необходимо сгущать. Очевидно, что это может быть достигнуто за счет

уменьшения размера ячеек и увеличения их числа в расчетной области. Причем изменение параметров разбиения приведет к сгущению сетки, как в требуемом месте, так и в остальных местах расчетной зоны, где не обязательно иметь густую сетку. Это в свою очередь приведет к увеличению времени расчета и потребных ресурсов компьютера, снизит устойчивость решения.

Для того, чтобы сгустить сетку в требуемых местах и не сгущать ее в остальных в программе *Gambit* используется так называемая размерная функция (*Size function*). Она позволяет сгустить сетку вблизи необходимого элемента. Причем размер ячейки в направлении от места сгущения увеличивается на заданную величину подобно тому, как увеличиваются элементы в упорядоченной сетке в пристеночной зоне. Это позволяет существенно сократить число элементов в расчетной области. Применение размерной функции дает наиболее хорошие результаты на неструктурных сетках.

Иллюстрация преимущества размерной функции над обычным изменением элемента приведена на рис. 3.28. Другой пример применения размерной функции в трехмерной модели приведен на рис. 3.29.

Меню построения и редактирования размерной функции (рис 3.30) вызывается командой:

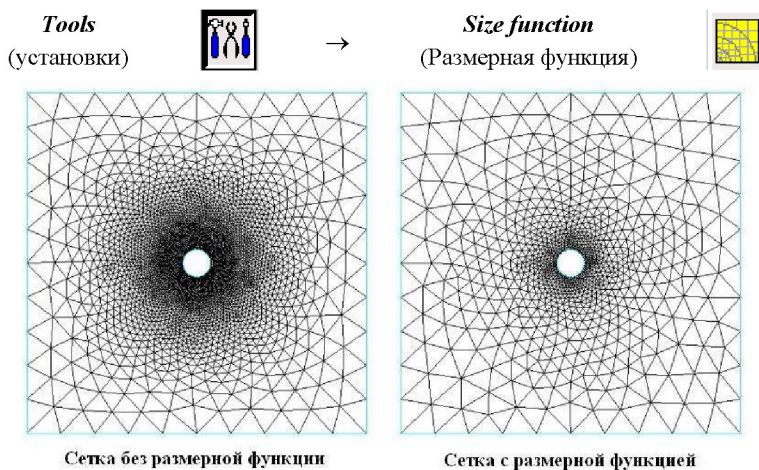
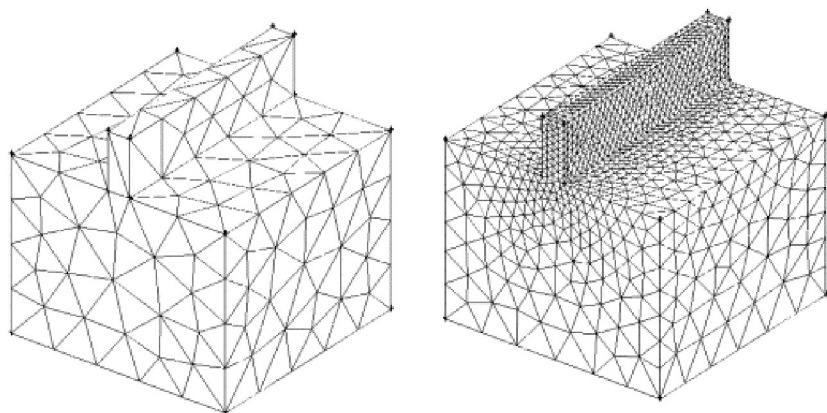


Рис. 3.28. Сравнение разбиения с размерной функцией и без нее



разбиение без размерной функции

разбиение с размерной функцией

Рис. 3.29. Пример улучшения конечноэлементной сетки с помощью размерной функции

Как видно из рис. 3.30, это меню состоит из нескольких кнопок, открывающих доступ к подменю построения и редактирования размерной функции.

Рассмотрим подробнее команду задания размерной функции, меню которой показано на рис. 3.31.

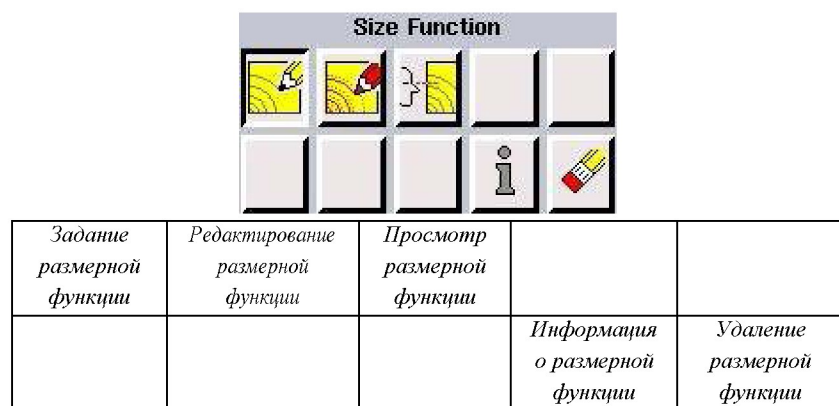


Рис. 3.30. Меню построения и редактирования размерной функции (*Size function*)

В этом меню в поле *Type* (1 на рис. 3.31) выбирается закономерность, по которой будет построена размерная функция. Всего доступны 4 закономерности:

- *Fixed* – при этом способе пользователем определяется размер элемента вблизи источника и фактор роста (во сколько раз увеличивается последующий элемент в направлении от источника). Максимальный размер ячейки, при котором разбиение сетки по размерной функции прекращается, задается непосредственно пользователем. Меню команды построения при таком способе показано на рис. 3.31;
- *Meshed* – пользователем задается максимальный размер элемента и фактор роста;
- *Curvature* – этот способ применяется при наложении размерной функции на объекты с большой кривизной. Размерная функция описывается теми же переменными, которые используются при способе *Fixed*. В дополнение к ним задается максимальный угол между нормальными прилегающих ячеек;
- *Proximity* – при этой закономерности в дополнение к переменным, которые используются при способе *Fixed*, вводится число конечных элементов, размещаемых в сгущаемой области.

В поле *Source* (2 на рис. 3.31) выбирается геометрический объект, вокруг которого будет происходить сгущение – источник сгущения. Им может быть точка, линия, поверхность или объем.

В поле *Attachment* (3 на рис. 3.31) следует выбрать элемент геометрии, к которому применяется размерная функция (на котором будет сгущаться сетка). Таким объектом может быть линия, поверхность или объем. Следует отметить, что источник не обязательно

The image shows a software dialog box titled "Create Size Function". It has several sections:

- Type:** A dropdown menu with "Fixed" selected, preceded by a small icon with the number 1.
- Entities:**
 - Source:** A dropdown menu with "Volumes" selected, preceded by a small icon with the number 2. To its right is a yellow square icon and an upward arrow.
 - Attachment:** A dropdown menu with "Volumes" selected, preceded by a small icon with the number 3. To its right is a small square icon and an upward arrow.
- Parameters:** Three input fields:
 - Start size:** Preceded by a small icon with the number 4.
 - Growth rate:** Preceded by a small icon with the number 5.
 - Max. size:** Preceded by a small icon with the number 6.
- Label:** An empty text input field.
- Buttons:** "Apply", "Reset", and "Close" at the bottom.

Рис. 3.31. Меню задания размерной функции

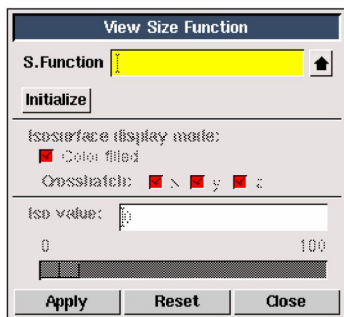


Рис. 3.32. Меню команды *View size function*

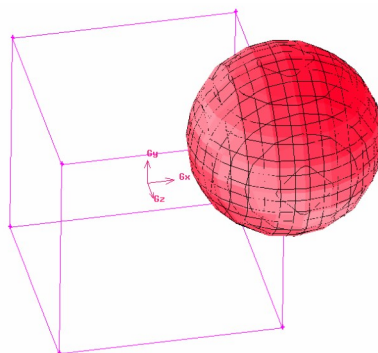


Рис. 3.33. Визуализация размерной функции с помощью команды *View size function*

должен принадлежать объекту, на котором строится сгушаемая сетка.

В поле *Start size* (4 на рис. 3.31) вводится размер конечного элемента вблизи писточника сгушения. В поле *Growth rate* (5 на рис. 3.31) вводится коэффициент роста, показывающий во сколько раз ячейки $i+1$ -го ряда больше ячеек i -го ряда в направлении от источника. В поле *Max.size* (6 на рис. 3.31) вводится максимальный размер конечноэлементных ячеек, после которых сгушение прекращается. Для применения введенных настроек следует нажать кнопку «Apply».

После того, как размерная функция была описана, следует построить сетку на объектах, выбранных в поле *Attachment* (3 на рис. 3.31). Конечноэлементная сетка будет иметь сгушение. Обратите внимание, что если в меню построения сетки будет активна опция *Ignore size function*, то сетка на элементе будет построена без учета размерной функции.

Просмотреть каким образом будет выглядеть сетка с учетом наложенной размерной функции, не прибегая к разбиению, можно с

помощью команды *View size function* . Меню этой команды показано на рис. 3.32. В этом меню в списке *S. Function* нужно выбрать требуемую размерную функцию из списка с помощью кнопки . После этого следует нажать кнопку *Initialize*, находящуюся ниже. После выполнения этого действия, перемещая полосу прокрутки, в нижней части можно увидеть,

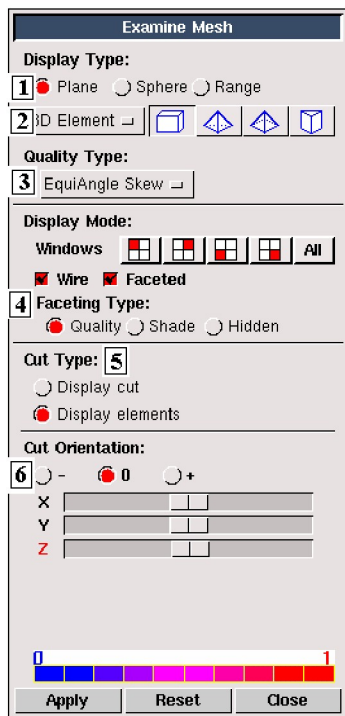


Рис. 3.34. Меню команды

Examine Mash

управления видами в нижней части рабочего окна программы (10 на рис.1.15). Меню команды показано на рис. 3.34.

С ее помощью можно просмотреть конфигурацию конечных элементов в различных сечениях расчетной области и значения параметров, характеризующих качество конечных элементов. Выбор того, что будет отображаться, производится в поле *Display Type* (1 на рис. 3.34). Возможны три варианта отображения конечных элементов:

- *Plane* – отображаются конечные элементы, пересекаемые плоской секущей поверхностью;
- *Sphere* – отображаются конечные элементы, пересекаемые секущей поверхностью в виде шара;
- *Range* – отображаются конечные элементы, находящиеся в заданном диапазоне изменения одного из параметров качества.

как меняется размер ячеек с помощью специальной поверхности, которая появится вблизи источника сгущения (рис. 3.33). Данная поверхность показывает положение ячеек одинакового размера относительно источника сгущения. Текущий размер ячеек показывается в поле *Iso value*.

Остальные действия с размерной функцией не отличаются от аналогичных манипуляций с геометрией и сеткой.

3.5. Оценка качества сетки

Программа *Gambit* имеет средства, позволяющие оценить качество построенной конечноэлементной сетки. Для этого используется команда

Examine Mash .

Кнопка вызова команды находится в нижней правой позиции меню

Первые два способа позволяют просмотреть конфигурацию ячеек сетки в различных сечениях расчетной области, включая внутренние элементы, и отличаются только типом секущей поверхности. Третий способ дает возможность оценить качество сетки с помощью нескольких критериев.

Вид меню команды при выборе отображения ячеек в различных сечениях показан на рис. 3.34.

В этом окне в поле (2 на рис. 3.34), расположенном ниже *Display Type*, необходимо выбрать интересующий тип конечного элемента: двухмерный или трехмерный и его форму. Соответственно команда *Examine Mash* будет выполняться только для выбранного типа ячеек.

Положение секущей поверхности задается с помощью трех полос прокрутки в поле *Cut Orientation* (6 на рис. 3.34). Для секущей поверхности в виде шара, кроме того, аналогичным образом задается диаметр. Каждая из полос определяет перемещение секущей поверхности перпендикулярно одной из координат (x , y или z). При этом в графическом окне отображаются конечные элементы, пересекаемые поверхностью (рис. 3.35). Если при этом нажать кнопку со знаком «-», находящуюся в верхней части поля *Cut Orientation*, то в графическом окне будут изображаться ячейки которые лежат в области отрицательных значений координаты, определяющей положение поверхности. Если активен знак «+» - будут отображаться ячейки находящиеся в области положительных значений (рис. 3.35).

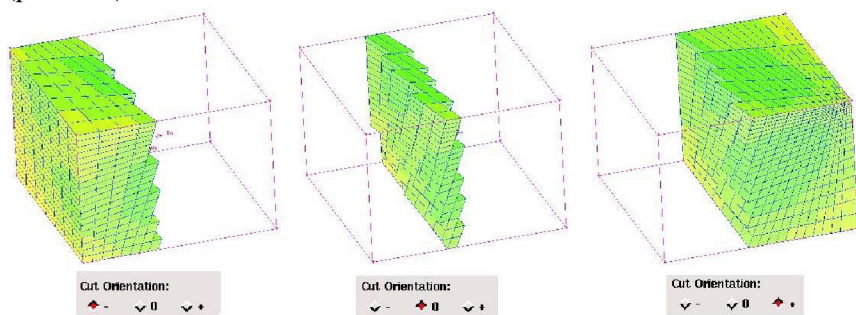


Рис. 3.35. Действие опции *Cut Orientation*

Если в поле *Cat Type* (5 на рис. 3.34) активна опция *Display Cut*, то в графическом окне изображается сечение конечноэлементной сетки,

заданной поверхностью (рис. 3.36, а). Если активна опция *Display Elements*, то в графическом окне изображаются все элементы, пересекаемые секущей поверхностью (рис. 3.36, б).

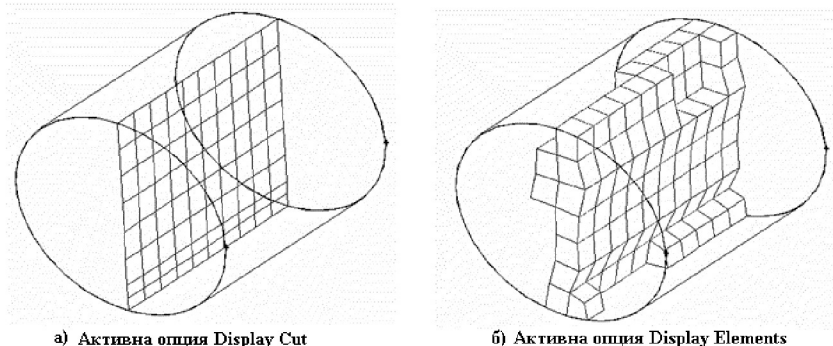


Рис. 3.36. Действие настроек в поле *Cut Type*

Если в поле *Faceting Type* (4 на рис. 3.34) выбрана опция *Quality*, то окраска конечных элементов соответствует значению параметра, характеризующих качество ячеек. Выбор критерия осуществляется в списке *Quality Type* (3 на рис. 3.34). Если в поле *Faceting Type* выбрана опция *Shade*, то сечение отображается в виде поверхности, если выбрана опция *Hidden*, то отображаются только видимые линии ячеек.

Для того, чтобы просмотреть значения коэффициентов, характеризующих качество сетки, в поле *Display Type* (1 на рис. 3.34) необходимо выбрать пункт *Range*. Меню команды при этом останется неизменным за исключением нижней части. Оно примет вид, показанный на рис. 3.37.

В этой части меню находятся две полосы прокрутки, которые определяют верхние и нижние границы рассматриваемого диапазона изменения параметра качества. В графическом окне будут отображаться ячейки, параметр качества которых находится в диапазоне от значения, указанного в поле *Lower*, до значения, указанного в поле *Upper*. Нажатие кнопки *Show worst element* покажет худший элемент по выбранному критерию. Численное значение критерия качества худшего элемента будет отображено при этом в окне сообщений. Выбор критериев качества осуществляется в списке *Quality Type* (3 на рис. 3.34).

Наиболее часто применяемым показателем качества ячейки является угловая скошенность (*Equi Angle Skew*). Этот параметр находится по следующему соотношению:

$$\theta_{ES} = \max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e} \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right]$$

где $\theta_{\min}$ - наименьший угол в

ячейке, град (рис. 3.38);

$\theta_{\max}$ - наибольший угол в

ячейке, град (рис. 3.38);

θ_e - углы равносторонней

ячейки (для четырехугольного конечного элемента $\theta_e = 90^\circ$, для треугольного - $\theta_e = 60^\circ$).

Величина угловой скошенности находится в интервале от 0 до 1. $\theta_{ES} = 0$ соответствует ячейке идеальной формы. Для четырехугольного элемента это прямоугольник, для треугольного – равносторонний треугольник. Чем ближе скошенность к 1, тем более вытянутой получается ячейка. При $\theta_{ES} = 1$ - качество элемента наихудшее – он вырождается в линию. Считается, что для получения корректного решения величина угловой скошенности не должна превышать 0,85.

Если скошенность превышает это значение, необходимо принимать меры по улучшению качества сетки. Оно может быть повышено за счет:

- применения структурного разбиения;
- предварительного управляемого разбиения элементов низшей геометрии;
- изменения размера ячеек;
- применения адаптации сетки в процессе расчета;
- перехода от тетраэдральной к полиэдральной сетке.

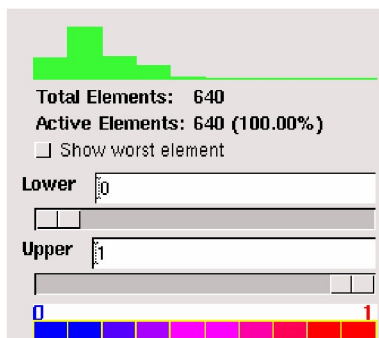


Рис. 3.37. Нижняя часть меню команды *Examine Mesh*, при активации опции *Range* в поле *Display Type*



Рис. 3.38. К объяснению понятия угловой скошенности

3.6 Примеры разбиения расчетной области на конечные элементы

3.6.1. Пример построения конечноэлементной сетки на линиях и поверхностях

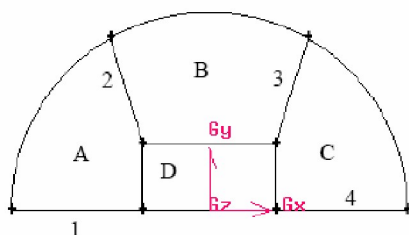


Рис. 3.39. Внешний вид расчетной модели

В этом примере предлагается освоить основные операции с сеткой и рассмотреть каким образом различные настройки влияют на конфигурацию ячеек.

Шаг 1. Создается геометрия расчетной области, на примере которой будут рассматриваться операции с сеткой. Внешний вид модели, которую предлагается построить показан на рис. 3.39. При ее создании рекомендуется пользоваться знаниями, полученными при изучении раздела 2.

Модель создается в следующей последовательности:

- создается круг радиусом 9 единиц с центром в начале координат

(команда  →  → );

- создается квадрат со стороной 6 единиц с центром в начале координат (команда  →  → );

динат (команда  →  → );

- круг делится квадратом с помощью команды (команда  →  →  →  →  в результате чего получается две поверхности: круглая поверхность с квадратным отверстием и квадрат;

- создается квадрат со стороной 20 единиц с центром в начале координат (команда  →  → )

и смещается вниз (вдоль оси OY) на 10 единиц;

- из круга с квадратным отверстием и малого квадрата вычитается

квадрат со стороной 20 (команда   ). В процессе построения модели при первом вычитании следует использовать опцию *Retain* (это приведет к тому, что вычитающая поверхность (большой квадрат) будет сохранен после выполнения операции), а при втором вычитании опция *Retain* должна быть не активна;

- на дуге строятся точки, которые станут основой для отрезков 2 и 3, разделяющих поверхности *A* и *B*, *B* и *C* соответственно (рис.

3.39). Для этого с помощью команды    на большой дуге ищется положение правой точки. Ее предлагается задать в цилиндрической системе координат (угол 60°). Для этого в меню *Split edge* (рис. 2.42) следует выбрать цилиндрическую систему координат (*Type – Cylindrical*) и ввести значение угла. Вторая точка получается делением оставшейся частью дуги пополам. Для этого в меню *Split edge* в поле *U value* (2 на рис. 2.42) задается отношение, в котором точка делит отрезок. В рассматриваемом примере это 0,5. Первую точку можно получить аналогичным образом, задав соотношение, в котором делится дуга равным 33,333%.

- Используя полученные точки, создаются два отрезка (2 и 3 на рис. 3.39). С их помощью большая поверхность делится на 3 части,

использу команду   .

В результате выполнения всех манипуляций будут получены четыре непересекающихся поверхности (*A*, *B*, *C*, *D*), изображенные на рис. 3.39.

Шаг 2. На поверхность *D* накладывается сетка (команда  ).

 с размером ячейки 0,5 единицы. Для задания размера в списке в поле *Spacing* (рис. 3.13) выбирается пункт *Interval size* (размер элемента) и вводится размер ячейки. Тип элемента (*Elements*) – четырехугольный (*QUAD*), схема разбиения (*Scheme*) – *Map*.

Обратите внимание на то, что вначале следует выбрать объект, на который накладывается сетка, а затем делать необходимые настройки. Если выбор элемента сделать в конце, то настройки будут аннулированы.

Как видно, процесс разбиения начинается с ребер и затем на конечные элементы делится поверхность.

Шаг 3. На поверхность *C* накладывается сетка с размером ячейки 0,5 единицы. Тип элемента (*Elements*)– четырехугольный (*QUAD*), схема разбиения (*Scheme*)– *Tri-Primitive*.

Шаг 4. На поверхность *A* накладывается сетка с размером ячейки 1. Тип элемента (*Elements*)– четырехугольный (*QUAD*), схема разбиения (*Scheme*)– *Tri-Primitive*. Обратите внимание, что назначенный размер ячеек применяется только для тех ребер, которые не были разбиты ранее.

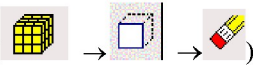
Шаг 5. На поверхность *B* накладывается сетка с размером ячейки 1. Тип элемента (*Elements*)– четырехугольный (*QUAD*), схема разбиения (*Scheme*)– *Map*.

После запуска команды в окне сообщения появится сообщение, что данная сетка не может быть построена. Это произошло от того, что при схеме разбиения *Map* на противоположных гранях поверхности четырехугольной топологии числа элементов должны быть одинаковы. А в данном случае отрезки 2 и 3 имеют разные размеры ячеек и, как следствие, различное число элементов.

Нажав кнопку (*Undo*)  следует отменить последнее действие. Это уничтожит разбиение, нанесенное на линии, после запуска предыдущей команды.

Следует повторить разбиение поверхности *B* на конечные элементы размером 1, но на этот раз по схеме (*Scheme*)– *Pave*.

Шаг 5. На поверхность *B* накладывается сетка с размером ячейки 1. Тип элемента (*Elements*)– четырехугольный (*QUAD*), схема разбиения (*Scheme*)– *Map*.

Шаг 6. С помощью команды *Delete Meshes* () следует удалить сетку с поверхности *B*. При этом опция *Remove unused lower mesh* (рис. 3.21) должна быть активна. Это приведет к удалению разбиения и с линий, не принадлежащих другим разбитым поверхностям.

Удалить разбиение на поверхности B также можно сделать, отменив

последнюю команду с помощью кнопки (*Undo*) .

Шаг 7. С помощью команды *Mesh edge* ( →  → ) верхняя линия поверхности B разделяется на 11 конечных элементов. Для этого в меню в списке поле *Spacing* (рис. 3.11) выбирается пункт *Interval count* (число элементов) и число ячеек.

После этого поверхность B вновь разбивается на конечные элементы с размером ячейки 1 по схеме *Pave*. При настройке параметров следует обратить внимание на то, чтобы опция *Remove Lower Mesh* была не активна, иначе предварительное разбиение линий будет удалено перед нанесением сетки на поверхность.

Шаг 8. В командной строке вводится команда *Reset mesh*. Она приведет к удалению разбиения на конечные элементы во всей расчетной области.

Шаг 9. Линии 1... .. 4 (рис. 3.39) с помощью команды  →  →  разбиваются на элементы со сгущением к одному из

концов. При выборе линий следует обратить внимание на то, чтобы стрелки, которые будут видны на них при выделении, были направлены в центр круга. Если направление не совпадает с требуемым, на линии следует щелкнуть левой клавишей мыши, нажав при этом кнопку *Shift* на клавиатуре. В результате направление сменится на противоположное.

При настройке параметров разбиения области в *Grading* под полем *Ratio* (рис. 3.11) следует ввести значение градиента изменения конечных элементов равное 1,1. Число интервалов, на которое разбиваются линии равно 8.

Шаг 10. На поверхность D накладывается сетка с размером ячейки 0,25 единицы. Тип элемента (*Elements*)– четырехугольный (*QUAD*), схема разбиения (*Scheme*)– *Map*.

На поверхность B накладывается сетка с размером ячейки 1. Тип элемента (*Elements*)– четырехугольный (*QUAD*), схема разбиения (*Scheme*)– *Pave*.

Как видно в последнем случае, что размер ячеек меняется с большим градиентом. Это говорит о том, что простого разбиения недостаточно для получения качественной сетки. Для более качественного сгущения следует использовать *Size function*.

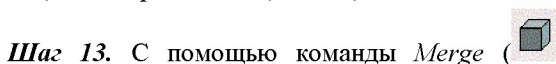
Шаг 11.... На линиях 1... .. и 4 (рис. 3.39) с помощью команды



наносится сетка с двухсторонним сгущением. Для этого в появившемся меню (рис. 3.11) следует активировать кнопку *Double sided*. В появившихся полях *Ratio 1* и *Ratio 2* следует ввести значения 1,2 и 1,4 соответственно.

Обратите внимание, что при выборе линий для разбиения также автоматически будут выбраны линии 2 и 3, поскольку они были автоматически связаны при разбиении в шаге 9. Поэтому перед выбором следует отключить опцию *Pick with Link* (выбирать без связывания).

Шаг 12. На поверхности *A* и *C* накладывается сетки по 14 элементов на каждой поверхности. Тип элемента (*Elements*)– четырехугольный (*QUAD*), схема разбиения (*Scheme*)– *Tri-Primitive*.

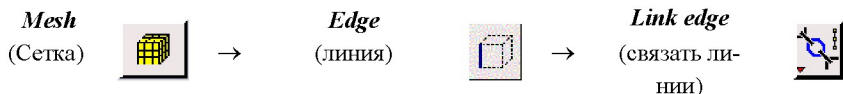


Шаг 13. С помощью команды *Merge* ( →  → ) поверхности *A* и *D* объединяются. После этого сетки, нанесенные на них ранее, исчезнут. Это наглядно показывает, что все манипуляции с геометрией нужно проводить до работы с сеткой.

3.6.2. Пример построения неструктурированной конечно-элементной сетки модели лопаточного венца турбины

В данном разделе рассматривается пример построения неструктурной сетки на двухмерной расчетной модели межлопаточного канала осевой турбины, созданной в п. 2.9.2.

Шаг 1. Как отмечалось выше, для корректного задания периодического граничного условия необходимо, чтобы данные границы имели связанную конечно-элементную сетку. Связанные элементы разбиваются на конечные элементы одинаково. Установить связь можно с помощью команды:



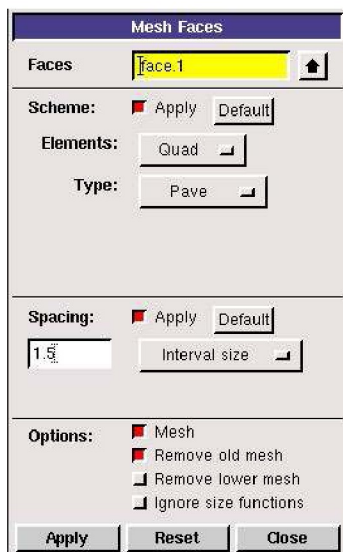
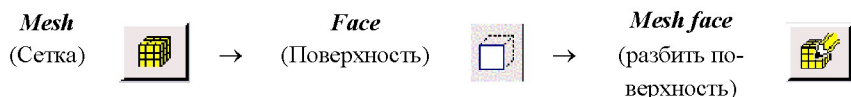


Рис. 3.40. Меню разбиения поверхности

В появившемся диалоговом окне с помощью мыши необходимо выбрать пару периодических элементов, например, боковые линии входной области, и подтвердить выполнение команды нажатием кнопки «Apply». Подобным образом необходимо связать все пары периодических элементов модели. Для рассматриваемого случая необходимо связать боковые линии входного и выходного участка.

Шаг 2. Разбиение поверхности осуществляется с помощью команды:



В результате появится меню, изображенное на рис. 3.40.

В нем следует провести следующие манипуляции:

- в поле *Face* надо выбрать поверхность, которая будет разбиваться;
- в поле *Elements* выбирается тип конечного элемента *Quad* (четырёхугольный), *Tri* (треугольный) или *Quad/Tri* (смешанный);
- в поле *Type* выбирается схема, по которой производится разбиение. Схемы *Submap*, *Map* используются для структурированной сетки, схема *Pave* – для неструктурированной. Для построения упорядоченной сетки необходимо выполнение некоторых дополнительных условий. Разбить рассматриваемую модель качественной упорядоченной сеткой не удастся без проведения дополнительных настроек

и построений. Поэтому при решении рассматриваемой задачи следует выбрать схему *Pave*;

- в поле *Spacing* (рис. 3.40) вводится требуемый размер конечного элемента (например, 1,5);
- для построения конечно-элементной сетки с выбранными настройками нужно нажать кнопку «Apply».

Результаты построения неупорядоченных треугольной и четырехугольной сеток приведены на рис. 3.41 и 3.42.

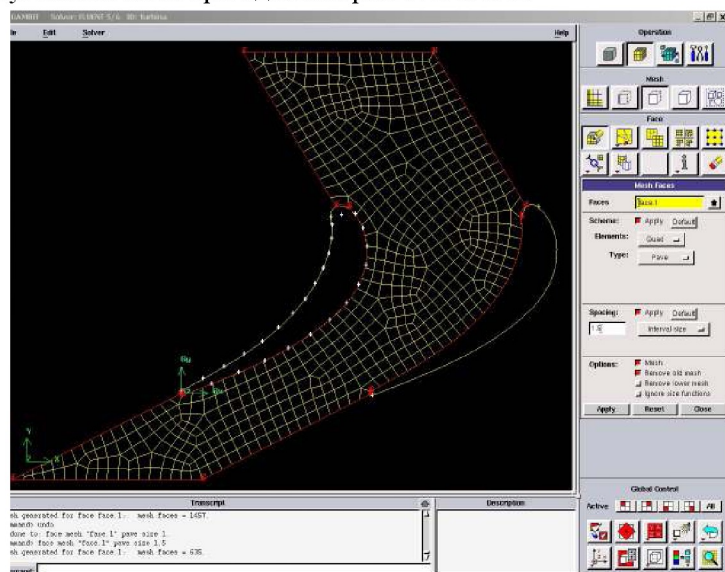


Рис. 3.41. Результат построения четырехугольной неструктурированной конечно-элементной сетки

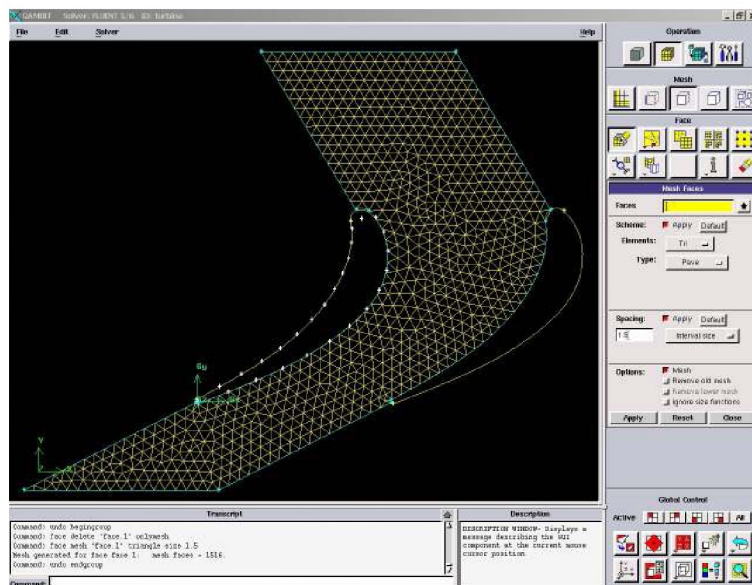
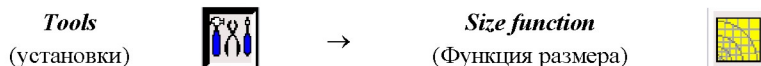


Рис. 3.42. Результат построения треугольной неструктурированной конечно-элементной сетки

Шаг 3. Очевидно, что для повышения точности расчета в местах с повышенным градиентом изменения параметров, например, в пограничном слое у поверхности лопаток, расчетная сетка должна быть более густой (с маленьким размером элементов). Если уменьшить размер конечных элементов в поле *Spacing* до требуемого уровня, то их число многократно возрастет во всей области, что значительно увеличит время расчета и снизит сходимость решения.

Загустить конечно-элементную сетку только в местах с большими градиентами параметров можно с помощью команд меню *Size Function* (рис. 3.43), которые вызываются следующим образом:



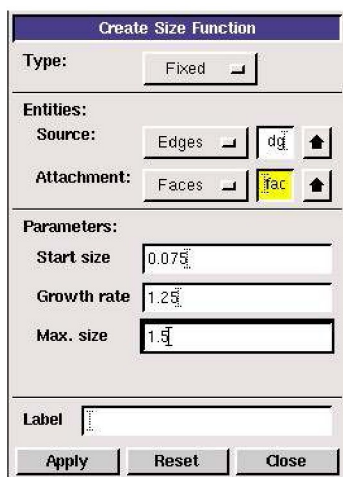


Рис. 3.43. Меню *Size Function*

В появившемся окне в поле *Source* нужно указать, что источником сгущения будет линия *Edges*. Затем с помощью мыши следует выбрать линии, рядом с которыми будет осуществляться сгущение. В рассматриваемом случае это контур лопатки.

В поле *Attachment* следует выбрать элемент, к которому будет применена функция размера. В рассматриваемом случае это поверхность расчетной модели. Поэтому в списке нужно выбрать *Face* и с помощью мыши отметить поверхность расчетной области.

В поле *Start size* вводится размер конечного элемента вблизи поверхности сгущения, например, 0,075 мм. В поле *Growth rate* задается во сколько раз ячейки $i+1$ -го ряда больше ячеек i -го ряда (например 1,25). В поле *Max.size* вводится максимальный размер конечно-элементных ячеек, после которых загущение прекращается (например, 1,5 мм). Для применения введенных настроек следует нажать кнопку «*Apply*».

Увидеть действие команды *Size Function* можно вновь построив сетку на поверхности модели так, как это делалось ранее. Перед этим необходимо удалить построенную раньше сетку:



С помощью мыши выбирается поверхность, с которой нужно удалить сетку. Кнопку *Remove unused lower mesh* следует оставить нажатой. Это удалит разбиение на конечные элементы граней (связь разбиения нарушена не будет). Для подтверждения команды удаления нужно нажать кнопку «*Apply*».

Результат разбиения расчетной области треугольной неструктурированной сеткой с учетом *Size Function* показан на рис. 3.44.

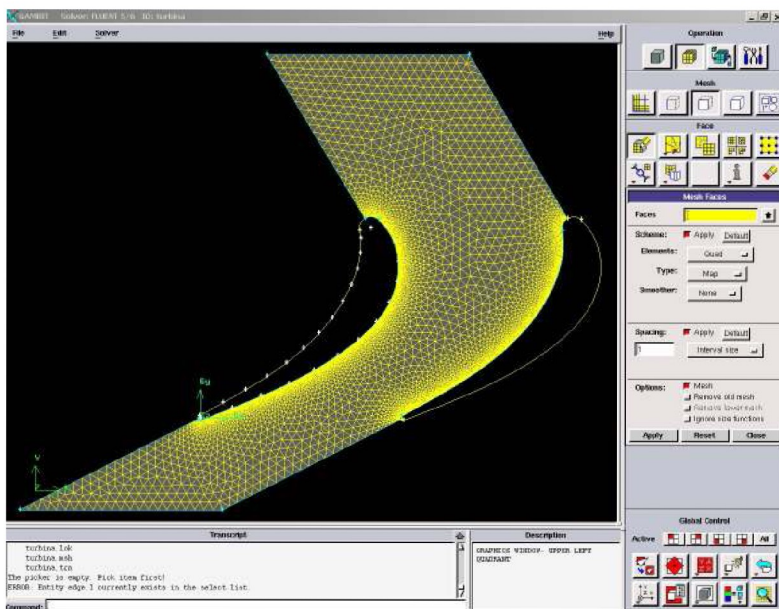


Рис. 3.44. Результат построения треугольной неструктурированной конечно-элементной сетки со сгущением вблизи стенок

Видно, что конечно-элементная сетка сгущена вблизи поверхности лопатки. В ядре потока размеры ячеек относительно большие.

Модель межлопаточного канала с конечно-элементной сеткой следует сохранить для использования в последующих примерах.

3.7. Построение структурированной конечноэлементной сетки

Как отмечалось выше одним из главных условий для получения решения повышенной точности является построение качественной структурированной сетки конечных элементов. Программа *Gambit* позволяет строить структурные сетки по нескольким схемам (алгоритмам) (рис. 3.45):

- *Map*;
- *Tri-primitive*;
- *Cooper*.
- *Submap*;
- *Wedge*;

Прежде чем рассматривать вопрос построения структурной сетки необходимо коснуться важного понятия «атрибута точки», на основе

которого в программе *Gambit* строится управление разбиением поверхности.

Атрибут определяет, сколько сеточных линий выходит из данной точки. Поэтому сочетание атрибутов всех точек разбиваемой поверхности определяет схему, по которой может происходить ее деление на конечные элементы. Грамотное определение атрибутов позволяет получить структурную сетку и управлять процессом разбиения. В случае построения неструктурной сетки атрибуты точек игнорируются.

Вы могли обратить внимание на то факт, что при выборе поверхности для разбиения на конечные элементы в угловых точках, находящихся в месте пересечения линий ее контура (далее по тексту угловые точки), появляются буквы латинского алфавита (рис. 3.46). Это и есть атрибуты. Его имеет каждая угловая точка контура поверхности.

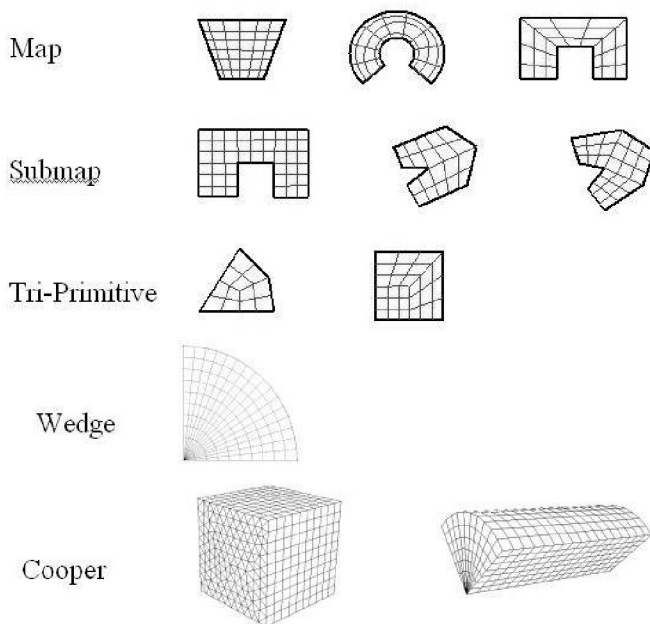


Рис. 3.45. Схемы построения структурных конечноэлементных сеток, применяемых в программе *Gambit*

Атрибут назначается точке применительно к поверхности, на которой она рассматривается. Поскольку точка в трехмерном объекте принадлежит нескольким поверхностям, то число атрибутов точки равно числу поверхностей. Атрибуты на разных поверхностях могут быть различными.

Атрибуты бывают пяти типов. Они автоматически присваиваются программой по величине угла между линиями, сходящимися в точке.

1. *End (E)* – [здесь и далее в круглых скобках указано обозначение атрибута, показываемое в графическом окне] – из точки не выходит ни одной сеточной линии. Этот атрибут характерен для вершин многоугольников. Атрибут *End* присваивается автоматически в том случае, когда угол между ребрами поверхности, сходящимися в точке составляет от 0 до 120° (рис. 3.47).

2. *Side (S)* – из точки выходит одна сеточная линия. Такое построение сетки характерно для точки, лежащей на боковом ребре многоугольника. Атрибут *Side* присваивается автоматически, когда угол между ребрами поверхности, сходящимися в точке, составляет от 120° до 216° (рис. 3.48).

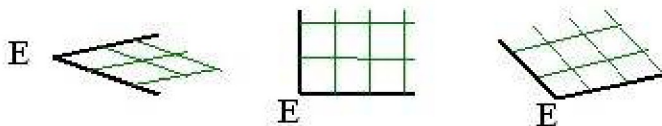


Рис. 3.47. Точки с атрибутом *End (E)*

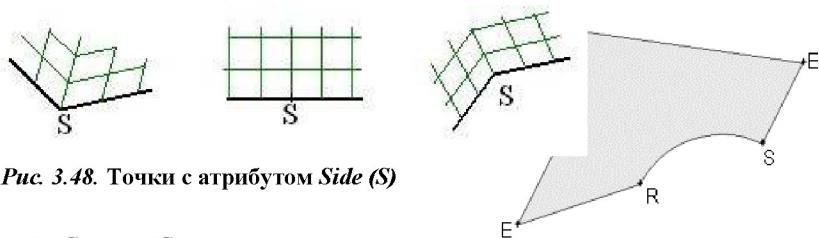


Рис. 3.48. Точки с атрибутом *Side (S)*

3. *Corner (C)* – из точки выходят две сеточных линии. Этот тип точки характерен для внутренних углов многоугольника. Атрибут *Corner* присваивается автоматически, когда угол между ребрами поверхности, сходящимися в точке, составляет от 216° до 309° (рис. 3.49).

Рис. 3.46. Атрибуты точек

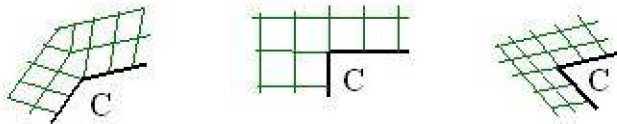


Рис. 3.49. Точки с атрибутом *Corner (C)*

4. *Reverse (R)* – из точки выходят три сеточных линии. Этот атрибут присваивается автоматически, когда угол между ребрами поверхности, сходящимися в точке, составляет от 309° до 360° (рис. 3.50).

5. *Trielement (T)* – из точки выходят четыре или более сеточных линий. Этот атрибут применяется при построении гибридной структурной сетки, состоящей из трех и четырехугольных элементов. Вблизи точки с таким атрибутом располагаются треугольные элементы (рис. 3.51).

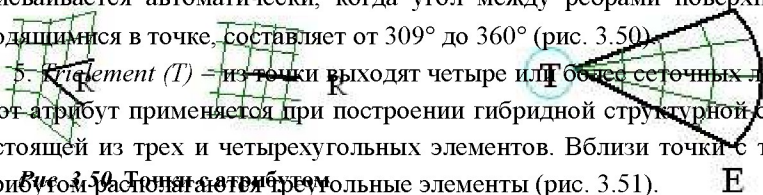
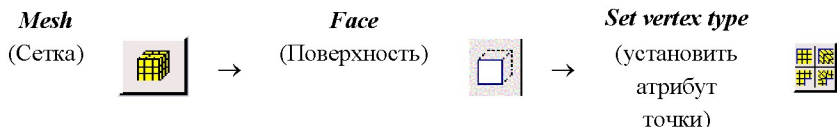


Рис. 3.50. Точка с атрибутом *Reverse (R)*

Рис. 3.51. Точка с атрибутом *Trielement (T)*

Изменение атрибута точки производится с помощью команды:



Поскольку, изменяя тип атрибута можно управлять процессом разбиения, эта команда активно применяется при построении структурных сеток. Меню команды показано на рис 3.52.

В этом меню в поле *Face (1)* выбирается поверхность, применительно к которой рассматривается атрибут точки. Сама же точка, атрибут которой нужно поменять, выбирается в поле *Vertices (2)*. В поле *Type (3)* выбирается нужный атрибут. После нажатия кнопки *Apply*, символ, обозначающий атрибут точки, в графическом окне будет заменен на требуемый.

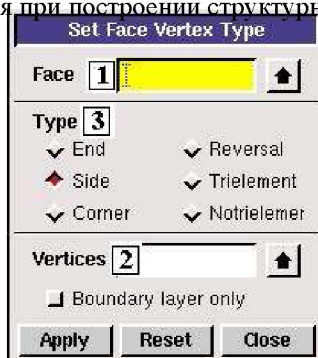


Рис. 3.52. Меню изменения атрибутов точек

Опираясь на полученные знания,

рассмотрим подробнее как строятся структурные сетки разных схем.

3.7.1. Построение структурной сетки по схеме Map

Структурная сетка, построенная по схеме *Map*, является самым простым и часто применяемым типом структурной конечноэлементной сетки в программе *Gambit*. В ее основе лежит четырехугольный конечный элемент. Примеры поверхностей, разбитых по схеме *Map* показаны на рис. 3.53.

Для того, чтобы поверхность можно было разбить структурно по схеме *Map* необходимо выполнение ряда условий.

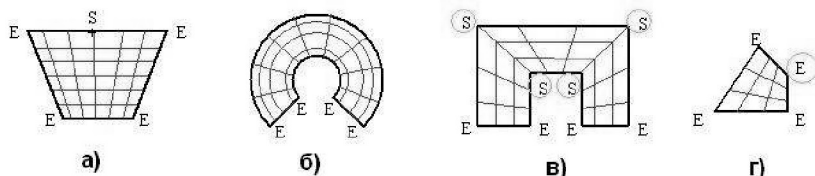


Рис. 3.53. Примеры разбиения поверхностей по схеме *Map*

1. Поверхность должна представлять собой топологический четырехугольник. Следует подчеркнуть, что фигура не обязательно должна быть четырехугольником в обычном смысле этого слова. Например, многоугольник *АБВГДЕЖИ* на рис. 3.54, *а* можно рассматривать как четырехугольник *АВДЖ*, который имеет стороны *АВ* и *ВД* и противоположные им *ДЖ* и *ЖА*. Круг изображенный на рис. 3.54, *б* можно представить как четырехугольник *АБВГ* с противоположными сторонами *АБ-ВГ* и *БВ-АГ*. С-образную поверхность на рис. 3.53, *б* также можно считать изогнутым четырехугольником.

2. Для разбиения конечноэлементной сеткой по схеме *Map* поверхность должна иметь 4 точки с атрибутами *End (E)* и любое число точек с атрибутом *Side(S)*. Точки с атрибутом *End (E)* должны располагаться в вершинах топологического четырехугольника.

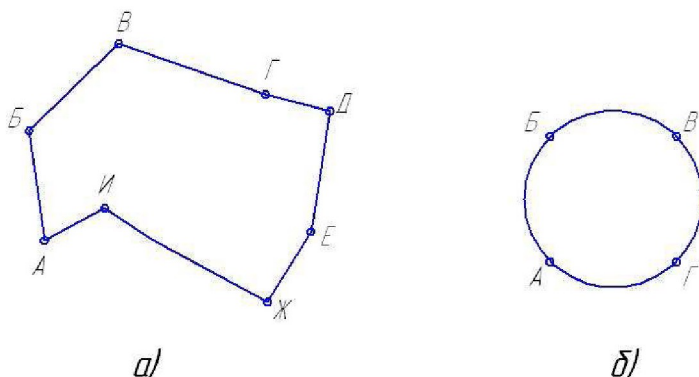


Рис. 3.54. Пример представления поверхности в виде топологического четырехугольника

3. Число конечных элементов на противоположных гранях топологического четырехугольника должно быть равным. Невыполнение этого требования является частой ошибкой, из-за которой не удастся построить *Map*-сетку. Поэтому в случае, если перед разбиением поверхности вначале разбиваются линии, следует стараться разбивать две смежные стороны топологического четырехугольника, а противоположные им ребра оставлять свободными от сетки. Если выполнить эту рекомендацию не удастся, следует строго следить за соответствием числа элементов на противоположных гранях четырехугольника.

Подводя итог сказанному выше можно заключить, что для разбиения поверхности по схеме *Map* необходимо сделать следующие манипуляции.

1. Оценить форму поверхности и выделить в ней топологический четырехугольник.
2. Проверить атрибуты точек. В вершинах четырехугольника должны быть установлены атрибуты *End (E)*, у остальных точек - *Side(S)*. При необходимости атрибуты точек заменить с помощью команды

Set vertex type .

3. Проверить совпадение числа конечных элементов на противоположных сторонах четырехугольника (если они разбиты). При необходимости число элементов корректируется.

4. Разбить поверхность на конечные элементы с помощью команды

Mesh face .

Для того, чтобы разбить объем структурной сеткой по схеме *Map* необходимо, чтобы каждую из его граней можно было разбить по этой схеме.

3.7.2. Построение структурной сетки по схеме *Submap*

Структурная сетка типа *Submap* представляет собой блочно-структурированную сетку на основе четырехугольных элементов. Примеры построения *Submap* сетки приведены на рис. 3.55.

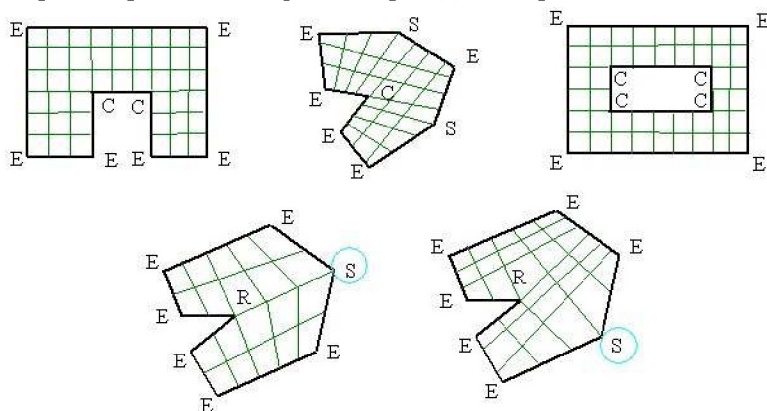


Рис. 3.55. Примеры построения структурной сетки по схеме *Submap*

Структурная сетка типа *Submap* может быть представлена как состоящая из нескольких блоков, разбитых по схеме *Map* (рис. 3.56).

Для того, чтобы поверхность можно было разбить структурно по схеме *Submap*, необходимо выполнить следующие условия.

1. Разбиваемая поверхность должна представлять собой фигуру, которую можно представить как совокупность нескольких четырехугольников. Матрицы точек, в углах топологических четырехугольников, должны быть типов *End*, *Corner* (C) или *Reverse* (R) (рис. 3.56).

2. Точки на границах поверхности должны иметь атрибуты по

следующей формуле: $4End(E) + L \times Side + M \times (End + Corner) + N \times (2 \times End + Reverse)$, где L, M, N – любые целые числа или ноль.

Стоит также отметить, что поверхность, которая может быть разбита по схеме *Map*, также может быть разбита и по схеме *Submap*.

Для того, чтобы разбить объем структурной сеткой по схеме *Submap* необходимо, чтобы каждая из его граней могла быть разбита по этой схеме.

3.7.3. Построение структурной сетки по схеме *Tri-primitive*

Конечноэлементная сетка, построенная по схеме *Tri-primitive*, имеет в основе четырехугольную ячейку. Сетка этого типа строится на топологически треугольной поверхности. При разбиении она делится на 3 блока, каждый из которых разбивается *Map* сеткой (рис. 3.57). Недостатком такой схемы является большая, по сравнению с *Map* и *Submap* сетками, скошенность ячеек.

Для того, чтобы поверхность можно было разбить структурно по схеме *Tri-primitive*, необходимо выполнить следующие условия.

1. Поверхность должна представлять собой топологический треугольник.
2. Угловые точки, соответствующие вершинам топологического треугольника, должны иметь атрибут *End*, остальные (если они есть) – атрибут *Side*.

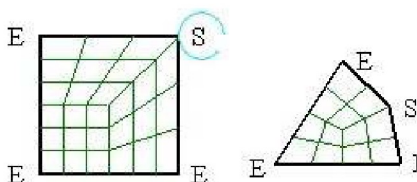


Рис. 3.57 Сетка, построенная по схеме *Tri-primitive*

3.7.4. Построение структурной сетки по схеме *Wedge*

Поверхностная конечноэлементная сетка, построенная по схеме *Wedge*, является гибридной. При разбиении по этой схеме используются как треугольные, так и четырехугольные конечные элементы. Схема применяется на топологических треугольных поверхностях, особенно неплохие результаты получаются на секторе круга. Сеточная поверхность образуется на базе лучей, выходящих из одного из углов расчетной области (рис. 3.51). Недостатком такого типа расчетной сетки является

возможность появления треугольных ячеек с большой угловой скошенностью.

Для того, чтобы поверхность можно было разбить структурно по схеме *Wedge*, необходимо выполнить следующие условия.

1. Разбиваемая поверхность должна представлять собой топологический треугольник или сектор круга.
2. Две угловых точки треугольника должны иметь атрибут *End*, третья - *Triangle*. Остальные точки (если они имеются) должны иметь атрибут *Side*.

3.7.5. Построение объемной структурной сетки по схеме *Cooper*

Схема разбиения *Cooper* применяется для построения структурной сетки на объемах. В ее основе лежат гексаэдральные и призматические элементы. Принцип построения сетки по данной схеме заключается в проецировании поверхностного разбиения с одной грани объема на противоположную. Причем проецироваться может несколько поверхностей на одну или несколько противоположащих.

Например, для объема, представляющего собой совокупность параллелепипеда и цилиндра (рис. 3.58), разбиение по схеме *Cooper* может происходить двумя путями:

- сетка с поверхности 3 проецируется на противоположные грани объема 1 и 2;
- сетка с поверхностей 1 и 2 проецируется на грань 3.



Рис. 3.58. К объяснению принципа построения сетки по схеме *Cooper*

Поверхности, с которых проецируется сетка, и грани, на которые происходит проецирование, называются «проецирующими поверхностями». Остальные поверхности называются боковыми. Число элементов по длине боковых поверхностей определяется выбранным размером ячейки (в поле *Spacing*) в меню разбиения

объема, либо предварительным разбиением одной или нескольких из боковых граней.

Для того, чтобы объем можно было разбить по схеме *Cooper* необходимо, чтобы все боковые поверхности могли быть разбиты по схеме *Map* или *Submap*.

Настройка разбиения по схеме *Cooper* производится в меню построения сетки на объеме (рис. 3.59).

В этом меню необходимо произвести следующие манипуляции.

1. В поле *Volumes*, выбирается разбиваемый объем.
2. В поле *Type* выбирается схема разбиения *Cooper*.
3. В поле *Sources* выбираются проецирующие поверхности. При выборе объема для разбиения по схеме *Cooper*, программа *Gambit* сама определяет проецирующие поверхности. В большинстве случаев автоматический выбор верен. Однако для сложных объемов программе не всегда удастся определить проецирующие поверхности. Поэтому стоит проверить правильность автоматического выбора и при необходимости внести коррективы. Поверхности, сетка с которых проецируется, предпочтительнее разбить заранее.
4. В поле *Spacing* задается размер конечного элемента для боковых поверхностей, если они не были разбиты заранее.
5. Запускается построение конечно-элементной сетки нажатием кнопки *Apply*.

Пример построения структурной сетки на объеме в виде полукольца с помощью схемы *Cooper* показан на рис. 3.60.

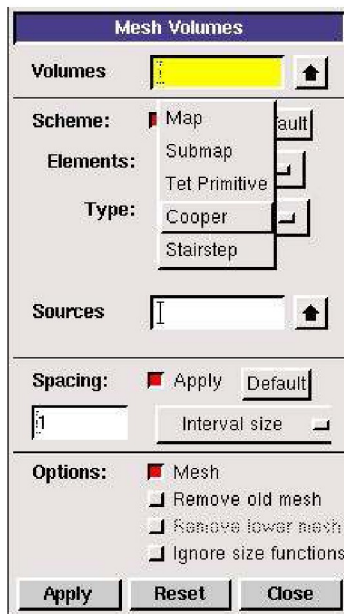


Рис. 3.59. Меню команды построения сетки на объеме по схеме *Cooper*

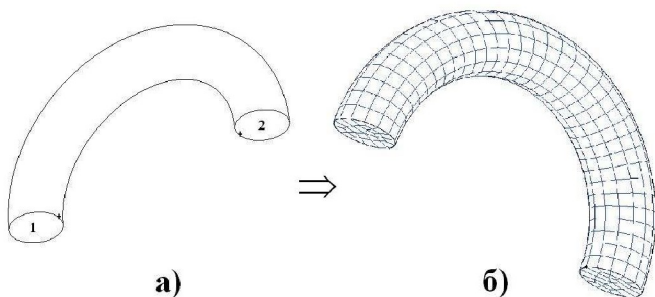


Рис. 3.60. Структурное разбиение полукольца по схеме *Cooper*: а – вид рассматриваемого объема; б – объем с расчетной сеткой

В этом объеме проецирующими поверхностями являются сечения 1 и 2. Сетка проецируется с поверхности 1 на 2 (или наоборот) вдоль образующей полукольца.

3.7.6. Стратегия построения структурной сетки на расчетных моделях сложной формы. Декомпозиция элементов

При построении расчетных моделей сложной формы часто возникает ситуация, когда на них не удастся наложить структурную конечноэлементную сетку. Зачастую это происходит из-за того, что модель не поддается разбиению по одной из рассмотренных выше схем. В этом случае проблема построения структурной сетки может быть решена за счет декомпозиции расчетной области. Под ней понимают разделение исходной модели на блоки, которые могут быть разбиты структурно. При этом предпочтительнее выделять блоки, в основе которых лежат топологические четырехугольники. Они могут быть разбиты по схемам *Map* или *Submap*. В результате, конечноэлементная секта расчетной области получается состоящей из нескольких блоков со структурным разбиением.

Разделение расчетной области на структурные блоки производится с помощью команды *Split* , операций вычитания  и пересечения  объектов. В ряде случаев возможно получение

структурного блока из нескольких неструктурных с помощью команды

Merge  или операции сложения .

3.8. Примеры построения структурной конечноэлементной сетки

Рассмотрим несколько примеров структурного разбиения сложных объектов с помощью декомпозиции.

3.8.1. Пример структурного разбиения куба со сферой внутри

В примере рассказывается, как наложить структурную сетку на расчетную область в виде куба, внутри которого имеется шаровидная полость (рис. 3.61, а).

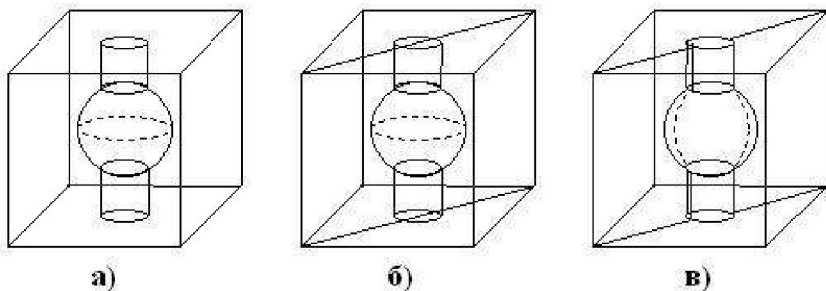


Рис. 3.61. Схема расчетной области

Рассматриваемая модель может быть разбита по схеме *Cooper*. Для этого необходимо спроецировать сетку с одной поверхности с отверстием на противоположную. Однако построить качественную сетку на поверхности с отверстием не удастся. Поэтому исходный объем можно разделить на две части диагональной плоскостью (рис. 3.61, б, в). Верхние грани полученных призматических объемов могут быть разбиты сеткой более высокого качества. Они используются в качестве проецирующих поверхностей при разбиении призм по схеме *Cooper*. Результат разбиения расчетной области описанным выше способом показан на рис. 3.62.

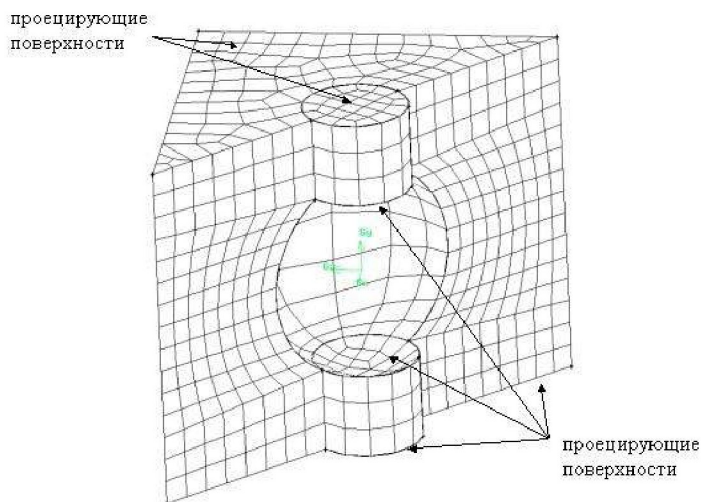


Рис. 3.62. Первый вариант разбиения конечноэлементной сеткой расчетной области

Если исходную фигуру поделить не одной, а двумя диагональными поверхностями, то проецирующие поверхности могут быть разбиты структурно по схеме *Map* и сетка на рассматриваемой расчетной области получится более упорядоченной (рис. 3.63).

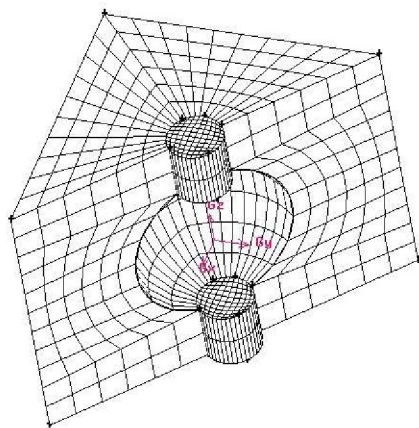


Рис. 3.63. Второй вариант разбиения конечноэлементной сеткой расчетной области

3.2.2. Пример структурного разбиения параллелепипеда с тором

В этом примере растеривается способ наложения структурной сетки по схеме *Cooper* на расчетную модель, изображенную на рис. 3.64. Она состоит из двух объемов: прямоугольного параллелепипеда и полукольца. Поверхность параллелепипеда, к которой примыкает полукольцо, состоит из двух частей: прямоугольника 3 с двумя отверстиями (эта часть принадлежит только параллелепипеду) и двум кругам 1 и 2 (эта часть принадлежит обеим частям модели). Построение сетки целесообразно начать с разбиения полукольца. Оно разбивается по схеме *Cooper* аналогично тому, как это было рассмотрено выше (рис. 3.60). Затем разбивается поверхность 3. Структурное разбиение параллелепипеда осуществляется по схеме *Cooper*. В качестве проецирующих поверхностей используются грани 1,2,3 и противоположная им поверхность. Результат разбиения показан на рис. 3.65.

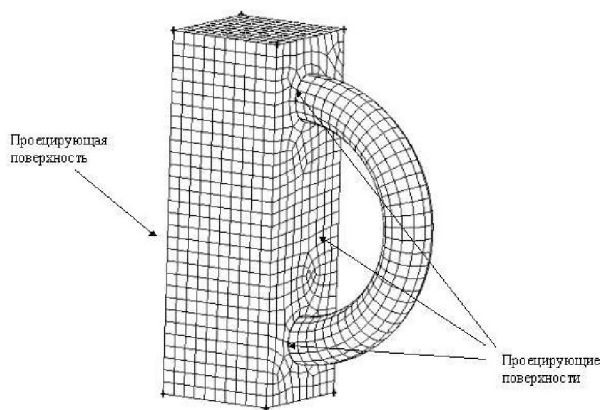


Рис. 3.65. Возможный вариант разбиения расчетной области сеткой конечных элементов

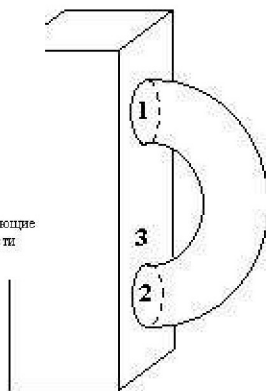


Рис. 3.64. Схема расчетной области включающей параллелепипед и тор

3.8.3. Пример структурного разбиения двух несоосных цилиндров

Необходимо

наложить

конечноэлементную сетку по схеме *Cooper* на модель, изображенную на рис. 3.66, а. Она состоит из двух цилиндров разного диаметра. Оси цилиндров пересекаются под прямым углом и лежат в плоскости симметрии большего цилиндра.

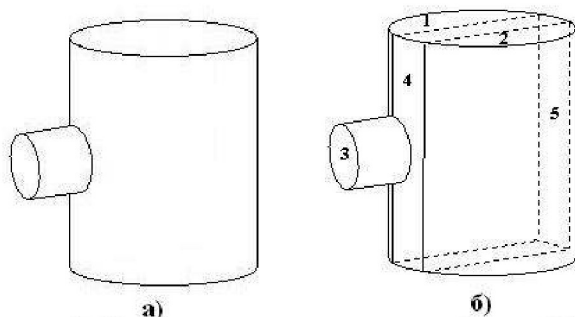


Рис. 3.66. Схема расчетной области, состоящей из двух несоосных цилиндров

Наложить структурную сетку по схеме *Cooper* на эту модель без декомпозиции не удастся, так как для разбиения по данной схеме необходимо, чтобы боковые грани объема могли разбиваться *Map* сеткой.

Поэтому исходную фигуру нужно разделить на блоки. На рис. 3.66, б показан один из возможных вариантов. Расчетная область делится двумя поверхностями, параллельными осям цилиндров и отстоящих от плоскости симметрии фигуры на расстояние, превышающее радиус малого цилиндра. В результате модель делится на 3 части: два объема, в основе которых лежат поверхности 1 и 2, а также тело, которое представляет собой шестигранник с цилиндром, выходящим из боковой поверхности. Все они могут быть разбиты по схеме *Cooper*, причем направления проецирования соседних объемов отличаются на 90° .

Разбиение следует начинать с центрального объема. В качестве проецирующих поверхностей используются грани 3 и 4, сетка с которых проецируется на поверхность 5. Два оставшихся объекта также разбиваются по схеме *Cooper*, используя в качестве проецирующих поверхности 1, 2 и противоположные им грани. Результат разбиения показан на рис. 3.67.

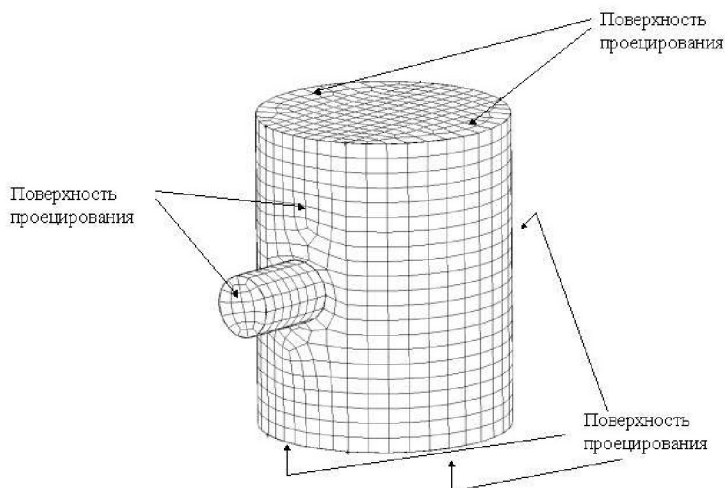


Рис. 3.67. Разбиение расчетной области, состоящих из двух несоосных цилиндров

3.8.4. Пример структурного разбиение шара

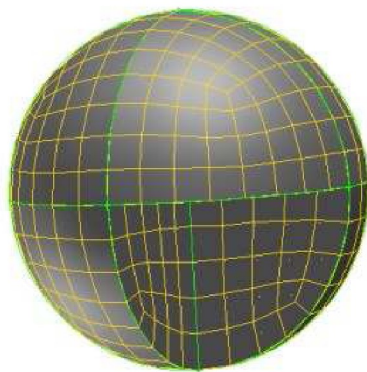


Рис. 3.68. Первый вариант нанесения структурной сетки на шар

Построить структурную сетку на шаре без проведения декомпозиции нельзя. Существует несколько способов его декомпозиции для нанесения структурной сетки. В качестве примера ниже приведены 2 варианта (рис. 3.68, 3.69).

Вариант 1. С помощью трех взаимно перпендикулярных поверхностей, проходящих через центр шара, он делится на 8 частей. Затем каждый из секторов

разбивается сеткой по схеме *Tri-primitive* (рис. 3.68).

Вариант 2. Строится вспомогательный цилиндр, ось вращения которого проходит через центр шара. С помощью его боковой

поверхности шар делится на две части: общего объема шара и цилиндра и объема, получающегося в результате вычитания из шара цилиндра. Второй объем делится пополам плоскостью проходящей через ось цилиндра. Полученные три объема могут быть разбиты по схеме *Cooper*, как это показано на рис. 3.69.

3.8.5. Пример структурного разбиения фигуры сложной формы

В данном примере показывается, как можно структурно разбить на конечные элементы фигуру сложной формы, меняя атрибуты точек. Внешний вид фигуры показан на рис. 3.70.

Создается объект. Для этого нужно выполнить следующие действия:

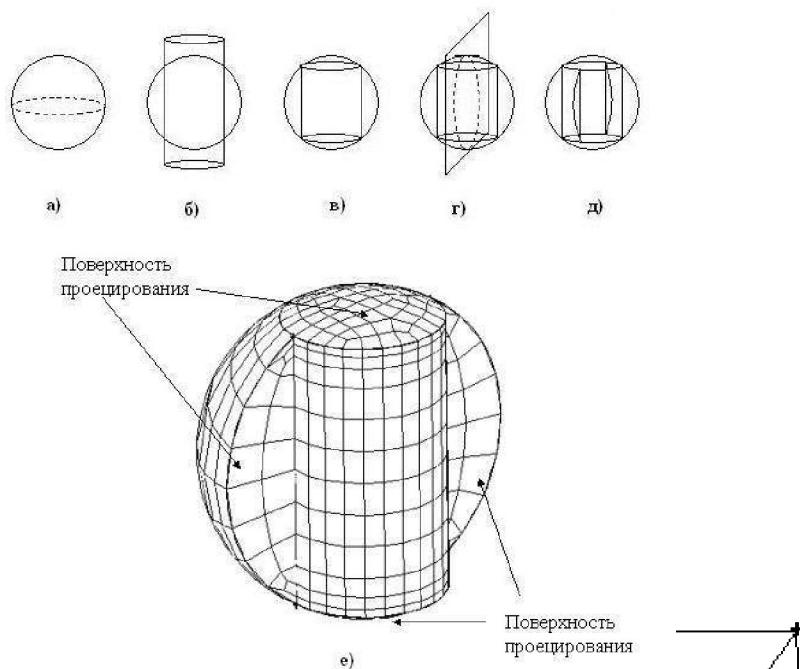


Рис. 3.69. Второй вариант нанесения структурной сетки на шар

- Создать куб со сторонами $10 \times 10 \times 10$ единиц, центр ко-

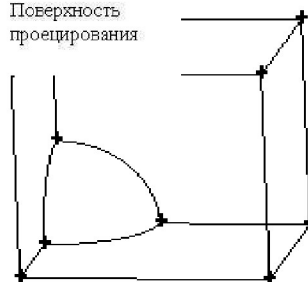


Рис. 3.70. Внешний вид фигуры из раздела 3.8.5

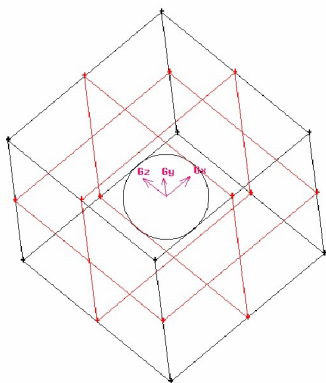


Рис. 3.71. Результат копирования боковых поверхностей куба

- того, что совпадает с началом координат (команда  → );
- создать сферу радиусом 2 единицы с центром в начале координат (команда  →  → );
- сферу вычесть из куба (команда  →  → );
- полученную фигуру разделить на 8 объемов координатными плоскостями. Для этого три смежных поверхности куба переместить перпендикулярно себе на 5 единиц (рис. 3.71) (команда  →  → );
- используя полученные поверхности, разделить фигуру на 8 частей (команда  →  → ). При этом опция *bidirectional* должна быть активна;
- 7 из 8 полученных объемов следует удалить или сделать невидимыми. В результате должна получиться фигура, изображенная на рис. 3.70.

Данный объем может быть разбит по схеме *Cooper* в направлении от внутренней сферической поверхности к трем квадратным поверхностям. Три боковые поверхности с полукруглым вырезом при этом должны биться по схеме *Map*. Для этого на них нужно поменять атрибуты точек. У них все точки, принадлежащие боковым поверхностям, должны иметь атрибут *End*, а точка, находящаяся напротив дуги – *Side*.

После выполнения настроек, описанный выше объем может быть разбит по схеме *Cooper* с размером ячейки 0,5. При разбиении следует указать проецирующие поверхности (*Sources* на рис. 3.59), поскольку в

данном случае *Gambit* не способен сам их выбрать. Возможно для успешного разбиения объема понадобится предварительное разбиение боковых поверхностей (с полукруглыми вырезами). Результат разбиения показан на рис. 3.72.

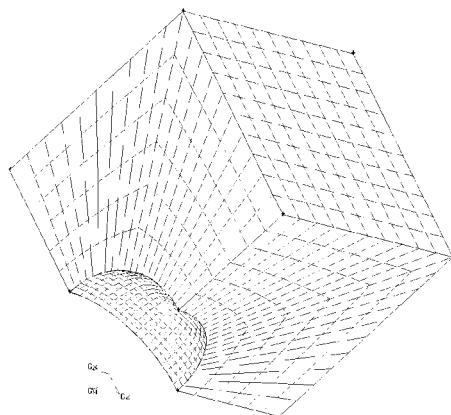


Рис. 3.72. Решение расчетной области сеткой конечных элементов

4. ОПИСАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ПРОГРАММЕ *GAMBIT*

Как отмечалось выше в программе *Gambit* осуществляется предварительное указание элементов расчетной области, к которым в дальнейшем будут приложены ГУ. Для двухмерных задач такими элементами являются линии, для трехмерных – поверхности. Кроме того, здесь можно выделить какую-либо часть расчетной области, свойства которой будут существенно отличаться от свойств других частей (например, твердое тело в сопряженной задаче или часть, находящаяся в другой системе координат, например, в подвижной). Числовые значения параметров на границах, описанных согласно рекомендациям настоящего раздела задаются в программе *Fluent*. Элементы геометрии, ограничивающие расчетную область и не отмеченные как граничные, автоматически считаются стенками. Указанный в программе *Gambit* тип ГУ в случае ошибки или изменения стратегии решения задачи можно скорректировать в программе *Fluent*.

Описание границ осуществляется в меню *Zones* (рис. 4.1), доступ к которому осуществляется нажатием третьей слева кнопки  в главном



Рис. 4.1. Меню *Zones*

меню (рис. 1.2). Как видно, группа меню задания граничных областей состоит всего из двух команд:

– *Specify Boundary Types*



- описание типа

ГУ на элементах геометрии, ограничивающих расчетную область;

- *Specify Continuum Types*  -
выделение области расчетной модели.

Меню описания типа ГУ на элементах геометрии показано на рис. 4.2.

ГУ может быть наложено на линию, поверхность или группу элементов. Элементы, на которых предполагается его установить, выбираются в поле *Entity* (1 на рис. 4.2). Тип элемента геометрии, который планируется использовать в качестве граничного, выбирается в списке (поверхность *Face* или линия *Edge*), находящемся в этом поле (*Faces* на рис. 4.2). Одно ГУ может включать произвольное количество элементов. Все они будут отображены в списке в нижней части поля *Entity*. Один элемент геометрии не может принадлежать двум разным ГУ.

В случае, если элемент был выбран ошибочно, он может быть удален обычным способом с помощью списка (рис. 1.18), доступ к которому осуществляется кнопкой . Альтернативным путем удаления является следующий. Ненужный элемент выбирается в списке (*Label – Type*) и удаляется нажатием кнопки *Remove*.

В поле *Action* (2 на рис. 4.2) выбирается планируемое действие с ГУ. Всего возможно четыре вида действия:

- *Add* – добавление граничного условия;
- *Modify* – редактирование существующего граничного условия;
- *Delete* – удаление граничного условия;
- *Delete all* - удаление всех созданных граничных условий.

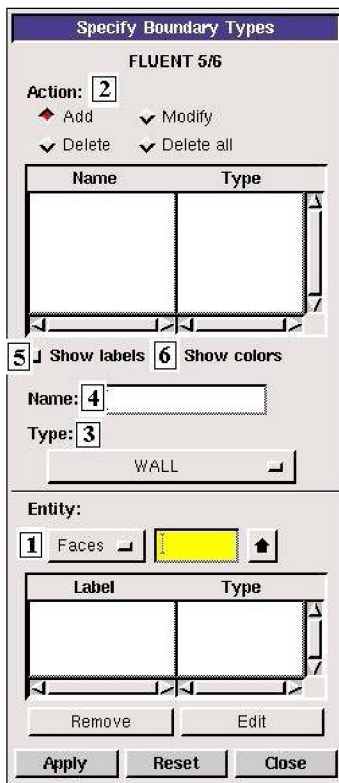


Рис. 4.2. Меню описания типа ГУ на элементах геометрии

Предполагаемый тип ГУ выбирается в списке *Type* (3 на рис. 4.2). Содержание списка зависит от расчетной программы, которая была выбрана в меню *Edit* → *Solver*. Для программного комплекса *Fluent* 5/6, используемого по умолчанию, в списке содержится примерно 20 типов ГУ. Часть из них носит узкоспециализированный характер и применяется достаточно редко. Наиболее употребимы следующие:

- *Pressure inlet* – условие «давление на входе». Оно подразумевает задние полного давления и температуры, а также направление вектора скорости входящего потока на выбранной границе. Это наиболее часто применяемое входное граничное условие;
- *Velocity inlet* – условие «скорость на входе». Данное условие подразумевает задание вектора скорости и температуры входящего потока. Это ГУ не применимо для сжимаемых потоков;
- *Mass flow inlet* – условие «массовый расход на входе». Это граничное условие задает массовый расход, полную температуру и направляющие косинусы вектора скорости входящего потока;
- *Pressure far field* – условие «статическое давление на удалении от границы». Подразумевает задание статического давления на удалении от границы, а также величины скорости (числа Маха) и ее направления. Данное ГУ применяется для решения задач внешнего обтекания (рис. 4.4);
- *Pressure outlet* – условие «давление на выходе». Это основной тип выходного ГУ, применяемый во *Fluent*. Оно определяет статическое давление потока на выходной границе;
- *Outflow* – выходное граничное условие, показывающее какая доля расхода выходит через данную границу. **Внимание!** Для корректного задания периодического ГУ обязательно необходимо, чтобы периодические границы имели связанную

конечноэлементную сетку (команда *Link* , см. раздел 3.2.4). Сетка с некорректно описанным периодическим условием не будет импортирована в решатель. При этом в окне сообщений (рис. 1.2) появится следующее: *Periodic Boundary Entities are not specified correctly. The two periodic entities must be link meshed and specified on*

the same Boundary Entity. No entities were found for mash export. Errors were found during export. Export file was not created;

- *Wall* – граничное условие стенки;
- *Periodic* – периодическое граничное условие;
- *Symmetry* – условие симметрии;
- *Axis* – условие «ось». Оно применяется для задания оси в осесимметричных задачах.

Как правило, каждая расчетная модель имеет как минимум три ГУ: входное (обычно это *Pressure inlet* или *Mass flow inlet*), выходное (*Pressure outlet*) и стенки (*Wall*) (рис. 4.3). В задачах внешнего обтекания вместо входного и выходного условия достаточно применить одно условие *Pressure far field* (рис. 4.4).

В графе *Name* (4 на рис. 4.2) можно задать имя ГУ с помощью латинских букв и цифр. Если поле оставить пустым, то имя будет назначено автоматически, исходя из типа ГУ.

Кроме отмеченных выше, в меню *Specify Boundary Types* находятся две опции:

- *Show labels* (5 на рис. 4.2) – показывает названия созданных ГУ в окне построения;
- *Show colors* (6 на рис. 4.2) – выделяет в окне построения созданные ГУ цветом. Цвет граничной поверхности указывает на ее тип (серый – *Wall*, голубой – *Periodic*, темно голубой – *Mass flow inlet*, красный – *Pressure outlet* и т.д.).

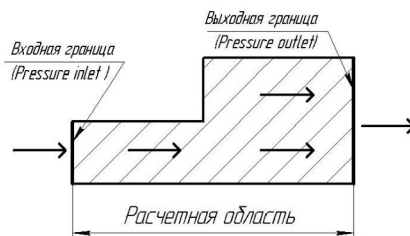


Рис. 4.3. Типовой набор и расположение граничных условий

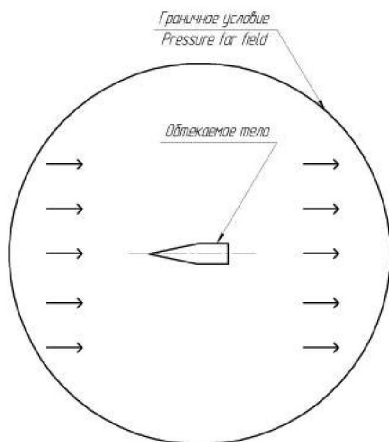


Рис. 4.4. Типовое задание граничных условий в задачах внешнего обтекания

Выбранные настройки для создания ГУ подтверждаются нажатием кнопки «Apply».

В результате выполнения команды в списке в верхней части меню появится имя созданного ГУ, а в области построения оно будет выделено цветом и появится его имя (если активны опции *Show colors* и *Show labels* соответственно).

Команда выделения области расчетной модели *Specify Continuum Types*  (рис. 4.1) используется для выделения

областей, свойства которых существенно отличаются от свойств другой части расчетной области.

Например, при рассмотрении сопряженного теплообмена расчетная область содержит область потока и обтекаемое тело. В этом случае одна область - это поток жидкости или газа, другая - твердое тело. При рассмотрении задач с подвижными элементами выделяется область потока, содержащая движущийся объект. Эта область рассчитывается в другой, подвижной СК.

Меню команды выделения области расчетной модели *Specify Continuum Types*  по внешнему виду и принципу работы с ним мало отличается от меню описания типа ГУ на элементах геометрии *Specify*

Boundary Types , показанного на рис. 4.2. Выбранная область расчетной модели может быть определена как *Solid* (твердое тело) или *Fluid* (жидкость или газ). Выбор осуществляется в поле *Type*.

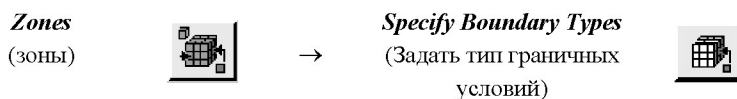
В случае, когда течение в расчетной области не содержит областей с сильно отличающимися свойствами, настройки в меню *Specify Continuum Types* можно не проводить. В этом случае вся расчетная область будет рассматриваться как жидкость или газ (*Fluid*) с одинаковыми свойствами.

Для иллюстрации основных приемов описания границ в программе *Fluent* рассмотрим этот процесс на примере расчетной модели двухмерной турбинной решетки (см. п. 2.9.2 и 3.6.2). Для этого следует загрузить созданную и разбитую на конечные элементы модель.

Для исследования течения в элементарном ЛВ следует используются следующие граничные условия (рис. 2.2):

- на входной границе - полные давление и температура потока, направляющие косинусы вектора скорости и граничные условия турбулентности;
- на выходной границе – статическое давление;
- на боковых поверхностях - периодическое граничное условие;
- на стенках лопатки - условие неприлипания рабочей среды.

Для выхода в меню задания граничных условий (рис. 4.2) следует нажать следующие кнопки в главном меню:



Для определения входной границы в нем необходимо произвести следующие действия:

- в поле *Action* необходимо нажать кнопку *Add*. Это действие укажет на то, что будет задана новая граничная поверхность;
- в графе *Name* можно задать наименование граничного условия латинскими буквами. Если поле оставить пустым, то имя ГУ будет назначено автоматически в соответствии с типом;
- нажать кнопки *Show labels* и *Show colors*. В результате в окне построения созданные ГУ будут подписываться и выделяться цветом;
- щелкнуть мышью по кнопке *Type*. В результате откроется доступ к списку доступных ГУ. Содержание списка зависит от расчетной программы, которая была выбрана в начале построения модели. Для задания входного граничного условия нужно выбрать *pressure inlet* (давление на входе);
- поскольку решаемая задача двухмерная, то ГУ будут задаваться на линиях. Для того, чтобы определить это, необхо-

димо щелкнуть мышью на кнопке в области *Entity* и в появившемся списке выбрать *Edge*;

- поставить курсор в поле напротив кнопки *Edge* и с помощью мыши выбрать входную границу расчетной области. Если произошла ошибка, то удалить линию из списка можно, нажав кнопку *Remove*;
- выбранные настройки границы подтверждаются нажатием кнопки «*Apply*».

В результате выполнения команды в списке в верхней части меню появится название созданного граничного условия, а в области построения оно будет выделено цветом и высветится его имя.

Аналогично на выходной границе расчетной области устанавливается ГУ *pressure outlet* (давление на выходе).

Как отмечалось выше, рассматриваемый межлопаточный канал должен иметь периодическое ГУ. Для его описания соответствующие граничные поверхности выбираются попарно, а в поле *Type* выбирается тип *Periodic*. Для задания периодического ГУ обязательно необходимо, чтобы непериодические границы имели связанную конечно-элементную сетку.

Результат описания ГУ показан на рис. 4.5. На остальных ограничивающих модель поверхностях, которые не были отмечены как граничные, по умолчанию будет установлено ГУ стенки (*Wall*).

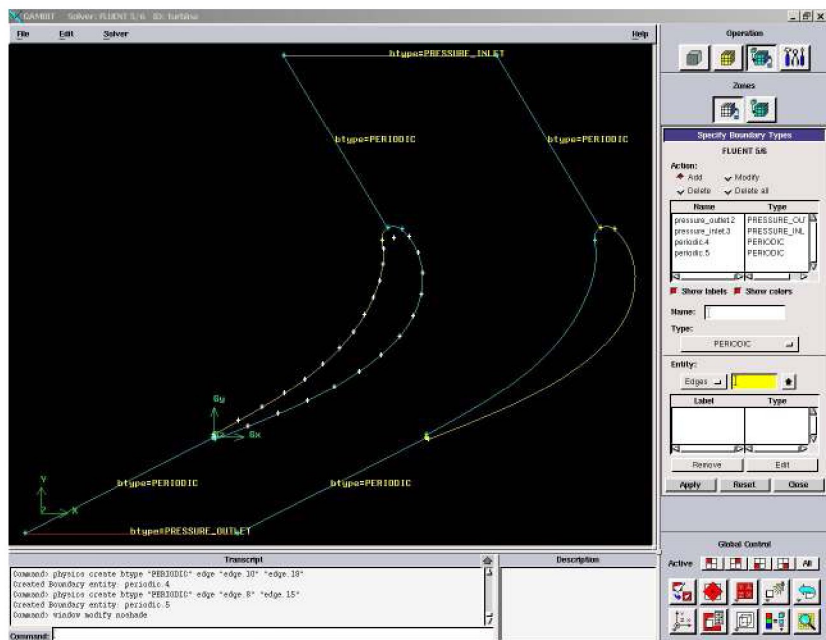


Рис. 4.5. Результат задания граничных условий

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х томах. – М.: «Мир», 1990. – 384с.
2. *Бойко А.В., Говоруценко Ю.И., Еришов С.В.* Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 341с.
3. *Гардзиевич А., Еришов С.В., Русанов А.В., Лампарт П.* Повышение эффективности ступени турбины высокого давления с помощью сложного навала лопаток статора // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Тр. междунаrod. науч.-техн. конф./НАН Украины и др. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, 1997. – С. 170 – 174.
4. *Еришов С.В., Русанов А.В.* Комплекс программ FlowER[®] для расчета трехмерных вязких течений в многоступенчатых турбинах и компрессорах // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Тр. междунаrod. науч.-техн. конф./НАН Украины и др. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, 1997. – С. 158 – 164.
5. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и их аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 178с.
6. *Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.П., Осипов М.И.* Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок: Учебник для вузов/ Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003 – 592с.
8. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150с.
9. *Пирумов У. Г., Росляков Г. С.* Численные методы газовой динамики. – М.: Мир, 1987. – 186с.
10. *Рейнольдс А. Дж.* Турбулентные течения в инженерных приложениях: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
11. *Турбулентность. Принципы и применение.* Под ред. У. Фроста и Т. Моудлена. – М.: Мир, 1980. – 220с.

12. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей в 2-х т. – М.: Мир, 1991. – 1056с.
13. Шу Д. Численные методы в задачах теплообмена: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 544 с.
14. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. - 711с.
15. *Daly, B.J., and Harlow, F.H.* Transport equations in turbulence, *Phys. Fluids*, 13(11), 1970. pp. 2634-2649.
16. *Gambit 2.3.16 users guide.*
17. *Ferziger J. H., Peric M.* Computational Methods for Fluid Dynamics. - 3., rev. ed. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002
18. *Fluent 6.3.26 users guide.*
19. *Lampart P., Yershov S.* 3D shape optimisation of turbomachinery blading // *CFD for Turbomachinery Application: Seminar/Summer School*, Sept. 01-03, 2001, Gdansk, Poland, p. 224.
20. *Launder, B.E., and Spalding, D.B.* The numerical computation of turbulent flows, *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, 3, 1974. pp. 269-289.
21. *Lien, F.-S., and Leschziner, M.A.* A pressure-velocity solution strategy for compressible flow and its application to shock/boundary-layer interaction using second-moment turbulence closure', *J. Fluids Eng.*, 115, 1993. pp. 717-725.
22. *L. Prandtl.* Über ein neues formelsystem für der ausgebildeten turbulenz, *Nachr. Akad.Wiss. Goettingen*, pp. 6-19, 1945.
23. *Wilcox, D.C.* 1998. "*Turbulence Modelling for CFD*". 2nd edition, DCW Industries, Inc.
24. *www.ansysolutions.ru.*
25. *http://fluent.com.*
26. *http://fluentusers.com.*